

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, руководитель «Отдела
релейной защиты, автоматики,
управления и связи»
Иван Михайлович Ноздрин
_____ 2018 г.

М.П.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
Сергей Анатольевич Ганджа
_____ 2018 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В
ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

ПОЯНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

Руководитель проекта доц., к.т.н.
Виктор Иванович Смолин

_____ 2018 г.

Автор проекта
студент группы П-474
Никифорова Елена Анатольевна

_____ 2018 г.

Нормоконтролер, доц., к.т.н.
Виктор Иванович Смолин

_____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Никифорова Е.А. Технология определения мгновенного электромагнитного момента электрических машин в тяговом электроприводе. – Челябинск: ЮУрГУ, Э, П-474; 2018, 79 с., 36 ил., 13 табл., библиогр. список – 28 наим., 1 лист чертежей ф. А3.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка технологии определения мгновенного электромагнитного момента асинхронной машины в составе тягового электропривода (ТЭП).

В ВКР рассмотрены классификация, назначение и область применения ТЭП. Описаны существующие методы управления ТЭП, в результате чего выбран энергетический метод управления электрическими машинами тягового электропривода, разработана функциональная схема информационно – измерительной системы ТЭП, позволяющая обеспечивать распределение крутящего момента между отдельными двигателями с приведенной погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$.

Проведены настройка, моделирование точностных характеристик и выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера математической модели электрической машины, выполненные на примере асинхронного двигателя. Полученные результаты свидетельствуют о реализуемости предъявляемых точностных требований к информационно – измерительной системе ТЭП.

Разработана функциональная схема ТЭП с эталонной моделью. В результате приведена технология проектирования информационно – измерительной системы ТЭП с требуемыми точностными характеристиками.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Зав кафедр</i>	<i>Ганджа</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Нормоконтр</i>	<i>СМОЛИН</i>				1	2	79
<i>Руководит</i>	<i>СМОЛИН</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра ТОЭ</i>		
<i>Разработал</i>	<i>Никифорова</i>						
<i>Утв.</i>	<i>СМОЛИН</i>						
<i>Технология определения электромагнитного момента в тяговом ЭП</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ: АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩАЮЩИМ МОМЕНТОМ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ	6
Структура тягового электропривода.....	10
Классификация тяговых электрических приводов.....	17
Выбор прототипа и метода решения задачи	21
Точность скалярного управления электромагнитным моментом.....	21
Точность векторного управления электромагнитным моментом	22
2. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ УПРАВЛЕНИЯ.....	25
3. МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИМ ДАННЫМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	33
Выбор способа настройки математической модели	37
Классификация методов оптимизации	38
Настройка модели по методу наискорейшего спуска.....	41
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	52
5. ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	57
Выбор датчиков тока	58
Выбор датчиков напряжения.....	61
Выбор датчиков углового перемещения	63
Выбор микроконтроллера	65
6. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ	67
7. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТРЕБУЕМЫМИ ТОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие тяговый электрический привод получил усиленное развитие. Это связано с непрерывной разработкой электросиловых установок транспортных средств и частичной заменой тепловых двигателей электрическими или гибридными. Главной координатой управления в тяговом электроприводе является крутящий момент. Так как прямой метод управления ТЭП не применяется в связи с рядом технических сложностей, в современном ЭП обратную связь по моменту формируют косвенным методом с помощью электромагнитного момента, который получают из эталонной модели электрической машины [1].

Актуальность данной темы заключается в необходимости повышения точности распределения момента между двигателями в многодвигательных взаимосвязанных либо групповых силовых установках автотранспортных средств и однодвигательных агрегатах, область применения которых обширна: начиная от намоточных устройств однодвигательных электроприводов и заканчивая многодвигательными электроприводами автотранспортных систем и промышленных конвейеров. Стоит отметить, что на данный момент, тяговый электропривод является одним из основных узлов электротранспортных средств. Его характеристики во многом определяют характеристики транспортного средства в целом. Развитие тягового электропривода проходит на основе предельно высоких технико-экономических требований [2].

Проблема недостаточного качества управления тяговым электрическим приводом связана с тем, что существующие методы управления не обеспечивают необходимую точность определения электромагнитного момента и распределение его по осям, в следствие чего снижается общий уровень надежности и безопасности

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

транспортных средств. Кроме того, это может привести к нарушению технологического процесса.

Целью ВКР является разработка технологии определения мгновенного электромагнитного момента электрических машин в тяговом электроприводе на примере асинхронного двигателя, позволяющая минимизировать погрешность определения момента до уровня приведенной погрешности не более $\pm 3\%$.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ: АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩАЮЩИМ МОМЕНТОМ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В настоящее время основным средством приведения в движение рабочей машины является электрический двигатель. Почти вся механическая энергия, используемая промышленностью и в сельском хозяйстве производится с помощью электромеханических устройств, питание которых осуществляется от источника электрической энергии.

В задачу электромеханических устройств входит управление механическим потоком мощности, производимого машинами, реализованными электрическим способом, с помощью электропривода.

В ГОСТ Р 50369-92 электропривод определяется как электромеханическая система, которая состоит из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих, информационных и измерительных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса [3].

Электропривод, предназначенный для тяги, называется тяговым электроприводом (ТЭП). Такой электропривод находит применение, например, в железнодорожном, водном, городском и промышленном транспорте. Создание гибридных автобусов является мировой тенденцией в автобусостроении. В этом направлении работают многие мировые производители. Наиболее активно над созданием гибридных силовых установок и автобусов работают североамериканские производители в сотрудничестве с крупными энергетическими компаниями и национальными лабораториями EPRI, General Electric, NREL, INEEL, ISE Research и др. США и Канада являются крупнейшими

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

потребителями гибридных автобусов, в основном дизель-электрических, также существуют китайские разработки электрических автобусов (см.рис.1.1) [4,5].



Рисунок 1.1 – Конструктивное исполнение гибридного автобуса.

В России разработки тягового электропривода несколько отстают от зарубежных аналогов. По заказу Правительства Москвы проводятся и работы по созданию элементов для тягового электропривода (батарей, суперконденсаторов, топливных элементов). Создан макетный образец транспортной платформы с мотор-колесами с приводом от СДПМ, накопителем на основе суперконденсаторов и силовым преобразователем на IGBT [6,7].

Тяговый электропривод является одним из основных узлов электротранспортных средств. Его характеристики во многом определяют характеристики транспортного средства в целом. Развитие тягового электропривода проходит на основе предельно высоких технико-экономических требований. Можно с полным основанием утверждать, что в тяговом электроприводе в настоящее время реализуется комплекс самых последних достижений в области электромеханики, силовой и управляющей электроники, управления.

Подобный вид ЭП имеет ряд особенностей, связанных как с регулированием момента, так и, соответственно, всего привода. В тяговом приводе ограничивается максимальный момент и мощность на валу привода. Ограничение максимального момента связано в первую очередь с требованиями, определяемыми силовой электроникой (максимальным током силового преобразователя); ограничение

гиперболой мощности определяется мощностью бортового источника (двигателя внутреннего сгорания (ДВС), буферного накопителя). Кроме того, необходимо учитывать его перегрузочные способности. Для асинхронных двигателей данное условие имеет большое значение, так как максимальный момент, после которого происходит опрокидывание, то есть двигатель уходит в разнос, находится в пределах $M_{\max} = (1.8 \dots 2.2)M_H$. Так же, при измерении и определении момента в тяговом асинхронном двигателе, необходимо учитывать точность системы измерения основных показателей электрической цепи, таких как ток, напряжение, мощность, угловое перемещение. Это связано с тем, что в асинхронных двигателях момент имеет квадратичную зависимость от напряжения, а, в синхронных, прямую зависимость от тока.

В режиме торможения происходит рекуперация, т.е. возврат кинетической энергии движения транспортного средства. Рекуперированная энергия может поступать в буферный накопитель или «сбрасываться» в тормозной резистор. Возможен также «сброс» энергии торможения в ДВС через обратимый мотор-генератор, при этом топливо в ДВС не подается.

В основном диапазоне мощностей 20...70 кВт наибольшее развитие получили асинхронный электропривод (АЭП) и электропривод с синхронным двигателем на основе постоянных магнитов (СЭППМ). Отметим, что в настоящее время отсутствует методика корректного сопоставления двигателей различных типов. АЭП характеризуется наилучшим соотношением цена/качество. СЭППМ имеет некоторое преимущество в КПД, но стоит дороже. В АЭП работа с ограничением мощности обеспечивается при ограничении напряжения питания двигателя за счет соответствующего ослабления поля. В синхронном приводе с постоянными магнитами поле практически не регулируется, что приводит к необходимости завышения установленной мощности преобразователя в 3—10 раз. Для приводов легких транспортных средств это приемлемо; для средних и тяжелых транспортных средств это приводит к недопустимому удорожанию системы привода.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

ТЭД и МГ в гибридном автомобиле питаются от силового преобразователя, максимальную выходную частоту которого можно регулировать и устанавливать в диапазоне до 500 Гц и более, в отличие от общепромышленных асинхронных двигателей, питаемых от сети 50 Гц и допускающих прямой пуск включением в сеть. Указанное отличие является принципиальным, поскольку появляется возможность существенного снижения массы тяговых двигателей практически без снижения их КПД. Вопросы оптимизации электродвигателей для транспортного применения далеко не тривиальны, они связаны не только с оптимизацией самого двигателя, но и с его охлаждением, конструкцией, выбором режимов его работы во всех областях частот вращения и нагрузок.

Тяговый теплоэлектрический привод автомобиля относится к электроприводам с однотипной энергетической установкой. В настоящее время, он проектируется для многих транспортных средств, в том числе: автосамосвалов и автопоездов, многоосных автомобилей повышенной проходимости с активным приводом прицепов, специальных автомобилей и автомобилей для пассажирских перевозок средней грузоподъемности.

Анализ систем ТЭА производится на основе общей теории электропривода и методов расчета систем тягового привода автомобильного транспорта [8].

За последние 10-15 лет тяговый электропривод получил интенсивное развитие в связи с непрерывной разработкой электросиловых установок транспортных средств и частичную замену тепловых двигателей электрическими либо гибридными. Развитие электроприводов связано с переходом от интенсивного развития производства к более эффективному ее использованию. Использование автоматизированного регулирования электроприводов позволяет оптимизировать технологические процессы с целью сокращения их энергоемкости.

Таким образом, под тяговым электроприводом понимается совокупность элементов электрического и механического оборудования, зачастую транспортным средством, предназначенная для контролируемого преобразования энергии от источника питания в энергию поступательного движения транспортного средства.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Структура тягового электропривода

Электропривод представляет из себя устройство, включающее комплекс электрических машин, электрических аппаратов, преобразователей, усилителей и информационного устройства. Механические элементы необходимы для передачи движения от двигателя к исполнительному механизму и управления им.

Транспортное средство может находиться в следующих режимах работы:

- пуск;
- движение с заданной скоростью;
- выбег;
- торможение.

В современном тяговом электроприводе обязательно наличие электрической машины, такой как генераторная электрическая машина (в составе электропривода), суперконденсатор или пробуксовщик, позволяющие накапливать энергию, вырабатываемую при торможении, которая могла бы обеспечивать вышеуказанные режимы работы [9]. Все модели современных тяговых электроприводов обладают электрическим торможением. Оно задействуется при активации генераторного режима функционирования двигателя. Во время торможения происходит выработка электроэнергии. Часть ее уходит на внутренние нужды. В тот же момент электрическое торможение происходит за счет того, что на тормозных же резисторах рассеивается оставшаяся избыточная энергия.

Структурная схема основных элементов тягового электропривода представлена на рис.1.2.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

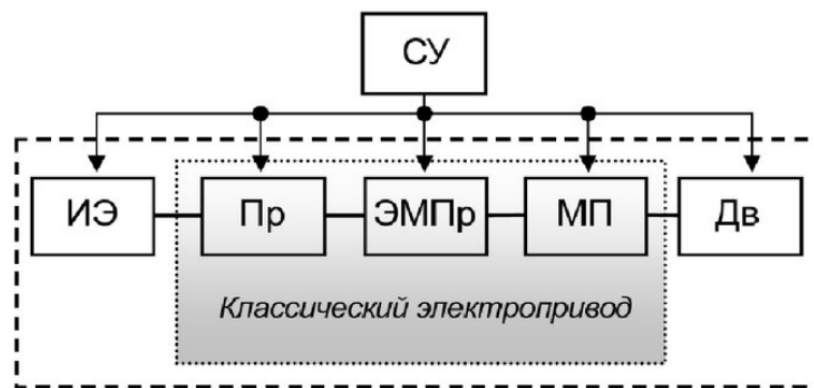


Рисунок 1.2 - Структурная схема тягового электропривода: СУ – система управления; ИЭ – источник энергии; Пр – преобразователь; ЭМПр – электромеханический преобразователь (тяговый двигатель); МП – механическая передача; Дв – движимое устройство (рабочий орган).

Преобразовательное устройство служит для преобразования электрической энергии. Оно необходимо для целенаправленного и экономичного изменения параметров движения электропривода, а именно скорости, момента, ускорения и т.д. К электрическим преобразовательным устройствам относятся управляемые выпрямители, преобразователи частоты, машины (см.рис.1.3). В нерегулируемом электроприводе отсутствует преобразователь, кроме случая, когда необходимо запитывать двигатель постоянного тока от сети переменного тока. Электрическое преобразовательное устройство обычно представляет собой преобразователь, выполненный на силовых полупроводниковых приборах (диодах, тиристорах, запирающих тиристорах, силовых транзисторах, биполярных транзисторах с изолированным входом IDBT).



Рисунок 1.3 – Преобразователь частоты.

К электродвигательному устройству относятся электродвигатели различного типа: двигатель постоянного тока (независимого, последовательного, смешанного возбуждения), асинхронные и синхронные двигатели, коллектор, линейные и шаговые двигатели (см. рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Двигатель переменного тока.

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Передаточное устройство – это редукторы, различного рода муфты, цепные и ременные передачи (см.рис.1.5). Для высокоточных механизмов и для машин, работающих в динамическом режиме, стремятся исключить динамические передачи между валом двигателя и рабочим органом механизма. Такие электроприводы называют безредукторными, при этом возрастают габариты и масса приводного двигателя, поскольку эти параметры при одной и той же мощности обратно-пропорциональны номинальной скорости электродвигателя.

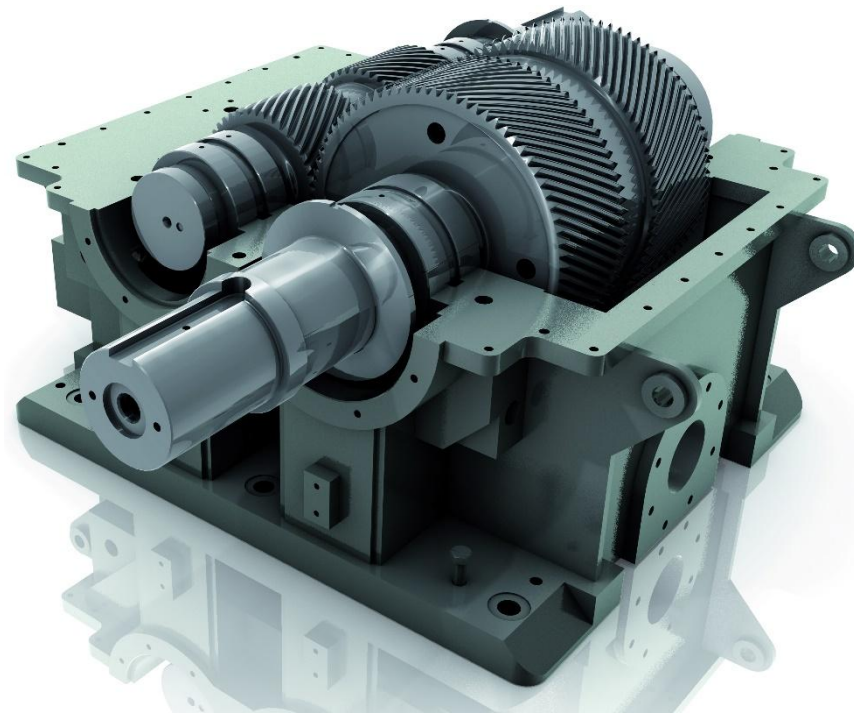


Рисунок 1.5 – Редуктор.

Система управления – это часть электропривода, обеспечивающая ему статические и динамические свойства. К управляющим устройствам относятся функционально связанные электрические аппараты защиты и управления, редукторы тока и скорости, построенные на типовых аналоговых и цифровых модулях или микроконтроллерах. Сюда можно отнести усилитель сигнала модуля управления.

Информационное устройство служит для сбора, обработки и передачи информации о работе управляемого объекта. К ним относят различного рода датчики скорости, температуры, микроконтроллеры и т.д. (см.рис.1.6). Важной

функцией информационно-управляющей структуры является реализация технологического процесса с минимальными затратами электрической энергии.



Рисунок 1.6 – Измерительная аппаратура тягового электропривода.

Для электромобилей функциональная схема тягового электропривода имеет следующий вид

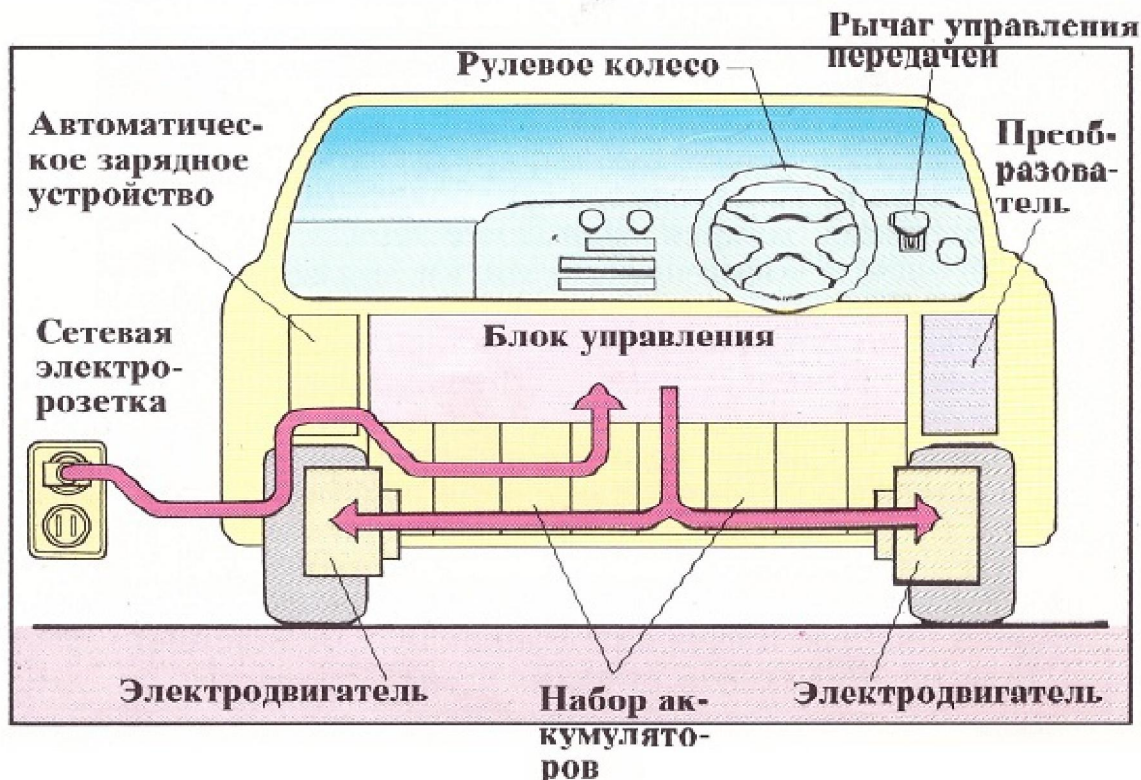


Рисунок 1.7 – Функциональная схема ТЭП электромобилей.

Стоит повториться, что одним из основных элементов электромобиля является электродвигатель, который служит для создания необходимого для движения крутящего момента. В качестве тягового электродвигателя используют трехфазные синхронные (асинхронные) электрические машины переменного тока мощностью от 15 до 200 и более кВт, что удовлетворяет значениям электродвигателей, указанных в техническом задании. В сравнении с ДВС электродвигатель имеет высокую эффективность и меньшие потери энергии. КПД электродвигателя составляет 90-95% против 25% у ДВС.

Основными преимуществами электродвигателя являются:

- реализация максимального крутящего момента во всем диапазоне скоростей;
- возможность работы в двух направлениях без дополнительных устройств;
- простота конструкции, воздушное охлаждение;
- возможность работы в режиме генератора.

Как упоминалось ранее, в ряде конструкций электромобилей используется несколько электродвигателей, которые приводят в движение каждое колесо по отдельности, что значительно повышает тяговую мощность транспортного средства. Электродвигатель может быть помещен непосредственно в колесо автомобиля, сокращая до минимума трансмиссию. Но такая схема электромобиля увеличивает неподрессоренные массы и ухудшает управляемость.

Трансмиссия электромобиля достаточно проста и на большинстве моделей представлена одноступенчатым зубчатым редуктором. Бортовое зарядное устройство позволяет заряжать аккумуляторную батарею от бытовой электрической сети. Инвертор преобразует высокое напряжение постоянного тока аккумуляторной батареи в трехфазное напряжение переменного тока, необходимое для питания электродвигателя.

Преобразователь постоянного тока обеспечивает зарядку дополнительной двенадцативольтовой аккумуляторной батареи, которая используется для питания различных потребителей электроэнергии (электроусилитель рулевого управления,

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

электрический отопитель салона, кондиционер, система освещения, стеклоочистители, аудиосистема и др.)

Так же существует монорельсовый транспорт с колесным опиранием, который эксплуатируется во всех развитых странах, обеспечивая перевозки пассажиров по городским линиям. Монорельсовая дорога устроена следующим образом (рис. 1.8): кузов 1 посредством элементов поддрессоривания 2 установлен на тележке 3, которая опирается на эстакаду 4 при помощи опорных катков 5. Катки 6 и 7 обеспечивают вертикальную и горизонтальную стабилизацию экипажа. Передвижение осуществляется за счет линейного асинхронного двигателя 8, обмотки которого расположены на тележке и взаимодействуют с реактивной шиной 9, закрепленной на эстакаде.

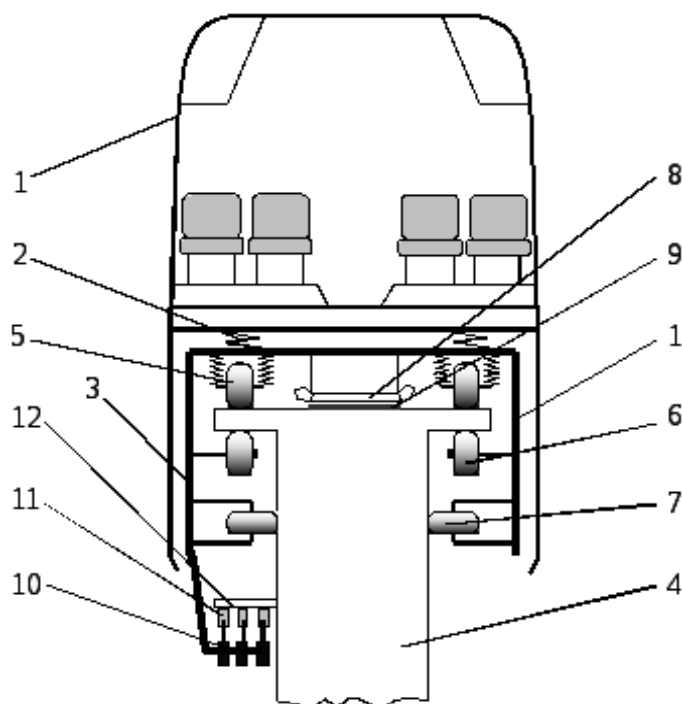


Рисунок 1.8 - Схема расположения подвижного состава монорельсовой дороги на эстакаде.

В силовую цепь подвижного состава электроэнергия поступает от токоприемников 10, взаимодействующих с токопроводами 11, закрепленными посредством кронштейнов 12 на эстакаде.

Классификация тяговых электрических приводов

Распределение тяговых электроприводов по категориям и группам зависит от критериев, которые взяты в основу классификации.

В зависимости от способа передачи механической энергии от двигателей к рабочим органам производственных машин, тяговые электроприводы делятся на 3 основные группы: групповой электропривод, одиночный или индивидуальный и взаимосвязанный электропривод (см.рис.1.9).

- Групповой электропривод – привод, в котором один двигатель приводит в движение с помощью трансмиссии или передач группу рабочих органов одной и нескольких машин. Привод громоздкий, неэкономичный – в настоящее время не применяется. Такой тип привода не способен обеспечивать точность распределения момента по рабочим органам.

- Одиночный привод – это привод, в котором приводится в движение только один рабочий орган машины. В настоящее время это основной вид привода. Такой привод позволяет упростить кинематику рабочей машины. В ряде случаев двигатель встраивается в механизм и образует с РО единое целое. К ним относят электроприводы моторных колес для транспортировки средств, электродрель и т.д. Новым направлением является создание электромеханических модулей, включающих в себя рабочий орган, двигатель и систему регулирования, как правило, на программируемых БИС, микроконтроллерах. Такие модульные устройства получили название мехатронных и чаще всего применяются в роботах и станках с программируемым управлением. С точки зрения точности определения момента, занимает лидирующие позиции, так как не создается необходимости в равномерном распределении электромагнитного момента.

- Взаимосвязанный электропривод содержит два и более двигательных устройства, связанные между собой электрически или механически. Одной из разновидностей взаимосвязанного электропривода является многодвигательный привод – это привод, в котором рабочий орган одной

										Лист
										17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР					

машины приводится в движение несколькими двигателями. Данный вид тягового привода распространен в электромобилях, тяговых установках транспортных, погрузочных средств, конвейерах и т.д. Однако, возникает проблема точного распределения момента между двигателями. Эта проблема ведет к появлению эффекта пробуксовки двигательного устройства, в том числе и автомобильного.

Многодвигательные приводы могут быть двух типов:

- Совокупность одиночных приводов одной ПМ, объединенных общим технологическим назначением. Пример: многодвигательного привода – эскалатор (3 одиночных привода: механизм напора, подъема, поворота).
- Когда несколько двигателей работают на общий механических вал. Применяется, когда нет двигателей на большую мощность и когда надо уменьшить инерционность привода [10].

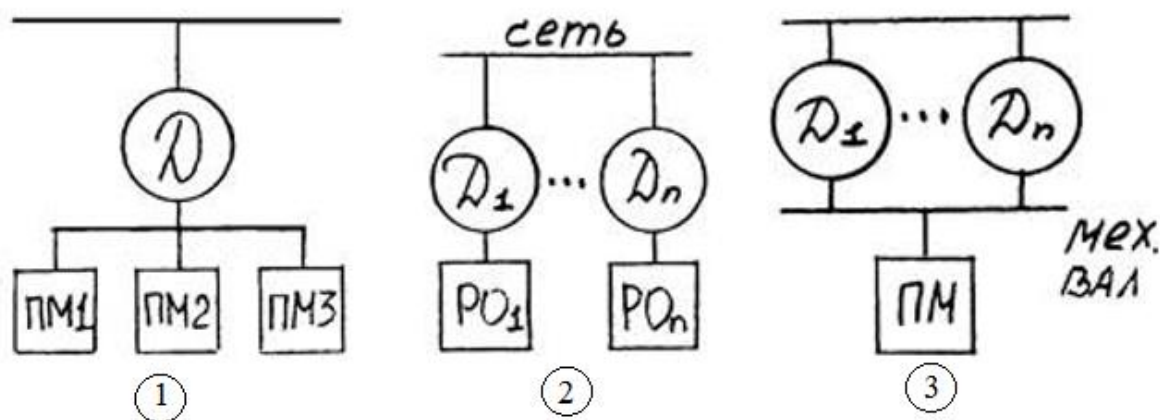


Рисунок 1.9 – Типы приводов: 1 - групповой электропривод; 2 - одиночный привод; 3 - взаимосвязанный электропривод.

По виду движения электропривода:

- вращательное,
- поступательное (формируется за счет использования преобразовательного механизма),

- однонаправленное движение,
- реверсивное движение.

В зависимости от типа управления все системы делятся на три группы:

- ручные, когда оператор сам следит за рабочими процессами, непосредственно управляя механизмами электропривода. Недостаток очевиден – это низкая точность, наличие человеческого фактора и медлительность системы. Этот тип управления используется редко, для выполнения базовых операций и контроля за одним процессом;

- полуавтоматические. В данном случае присутствие оператора обязательно, но его участие в процессе остается минимальным – он лишь воздействует на автоматические системы, причем контроль может производиться дистанционно. Главное преимущество – повышается быстродействие и точность обработки данных и регулировки процессами;

- автоматические системы управления не допускают участия оператора – все процессы контроля и регулировки электроприводами осуществляются в автономном режиме согласно заложенной программе и с учетом внештатных ситуаций.

По типу используемого тока электрические привода делятся на две категории:

- электропривод постоянного тока. Такие устройства появились в начале 80-х годов прошлого столетия и были единственным решением для регулировки скорости двигателя. Их устанавливали на прокатных станах, строительной технике, металлорежущих станках и других силовых агрегатах. Преимущество заключалось в легкости управления, а недостатки в обслуживании конструкции и небольшом ресурсе. Благодаря разработке асинхронных двигателей, доля таких электроприводов упала ниже 15% и продолжает уменьшаться;

- электропривод переменного тока. Он пришел на смену предыдущей категории электроприводов благодаря распространению асинхронных двигателей. Электроприводы могут быть регулируемые и

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

нерегулируемыми. Последние используются при изготовлении промышленного оборудования и бытового инструмента. Первые же, позволяют осуществлять точную регулировку механических и электромеханических характеристик, в том числе и электромагнитного момента.

Также тяговый электропривод можно разделить на две больших категории по виду размещения источника питания:

- размещаемые непосредственно на подвижном составе;
- размещаемые вне подвижного состава.

Первые, не зависимо от типа источника энергии, называются автономными, а вторые – централизованными. Отличительной особенностью последних является наличие тяговых сетей, через которые осуществляется питание электрооборудования от тяговых подстанций. Кроме того, существуют ТЭП с использованием комбинированного питания, которые питаются как от подстанций, так и от собственных источников питания.

Главной координатой управления в тяговом электроприводе является крутящий момент. Чтобы организовать внешнюю обратную связь по моменту, необходимо включить состав электроприемника датчик момента. Такой метод управления тяговым ЭП называется прямым и не применяется в связи с рядом технических сложностей. Во - первых, это использование сложной измерительной аппаратуры, такой как монометры. Они размещаются непосредственно между двигателем и нагрузкой. Во - вторых, для мощных двигателей, размеры монометров могут достигать значительных размеров (см.рис. 1.10), что говорит о больших площадях, занимаемых под данную установку. И в - третьих, в связи со значительными размерами данной аппаратуры, в число которой входят также различные датчики, цена всей установки может достигать внушительных размеров. Поэтому, в современном электроприводе, обратную связь по моменту формируют косвенным методом с помощью электромагнитного момента, который получают из эталонной модели электрической машины.

										Лист
										20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР



Рисунок 1.10 – Сравнение размеров монометра и обычного человека.

Выбор прототипа и метода решения задачи

Рассмотрим существующие методы управления тяговыми двигателями.

Точность скалярного управления электромагнитным моментом

Скалярное или частотное управление - метод управления бесщеточным электродвигателем переменного тока, который заключается в постоянном поддержании отношения напряжения к частоте (В/Гц) во всем рабочем диапазоне скоростей, таким образом, контролируется только величина и частота питающего напряжения [11].

Отношение В/Гц вычисляется на основе номинальных значений (напряжения и частоты) контролируемого электродвигателя переменного тока. Поддержание постоянного значения отношения напряжения к частоте позволяет поддерживать относительно постоянным магнитный поток в зазоре двигателя.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает несколькими существенными недостатками:

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

- необходимость в установке датчика скорости (скорость вращения вала асинхронного двигателя зависит от нагрузки);
- невозможность управления моментом. Конечно, эту задачу можно решить с помощью датчика момента, но стоимость его установки очень высока, и будет скорее всего выше самого электропривода. При этом управление моментом будет очень инерционным;
- нельзя управлять одновременно моментом и скоростью.

Функциональная схема разомкнутого асинхронного электропривода со скалярным управлением представлена на рис.1.11.

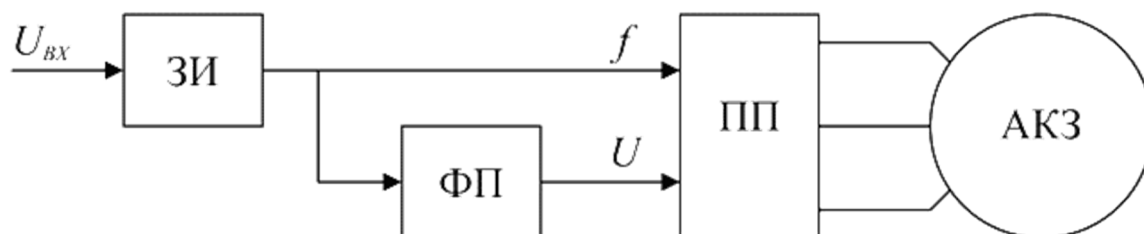


Рисунок 1.11 - Функциональная схема разомкнутого асинхронного электропривода со скалярным управлением.

Функциональный преобразователь (ФП) реализует один из законов регулирования, определяемый характером нагрузки. Полупроводниковый преобразователь (ПП) включает в себя автономный инвертор и его систему управления, задатчик интенсивности (ЗИ) формирует медленно нарастающий входной сигнал, необходимый для плавного нарастания скорости асинхронного короткозамкнутого двигателя (АКЗ) без колебаний момента и тока.

Точность векторного управления электромагнитным моментом

Векторное управление - метод управления, позволяющий контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и фазу. Другими словами, контролируется величина и угол пространственного вектора [12].

В системе векторного управления применяют упрощенные модели тяговых электромашин и формируют электромагнитный момент векторным способом по

тока и потокосцепления. На рис. 1.12 представлена общая функциональная схема векторного управления.

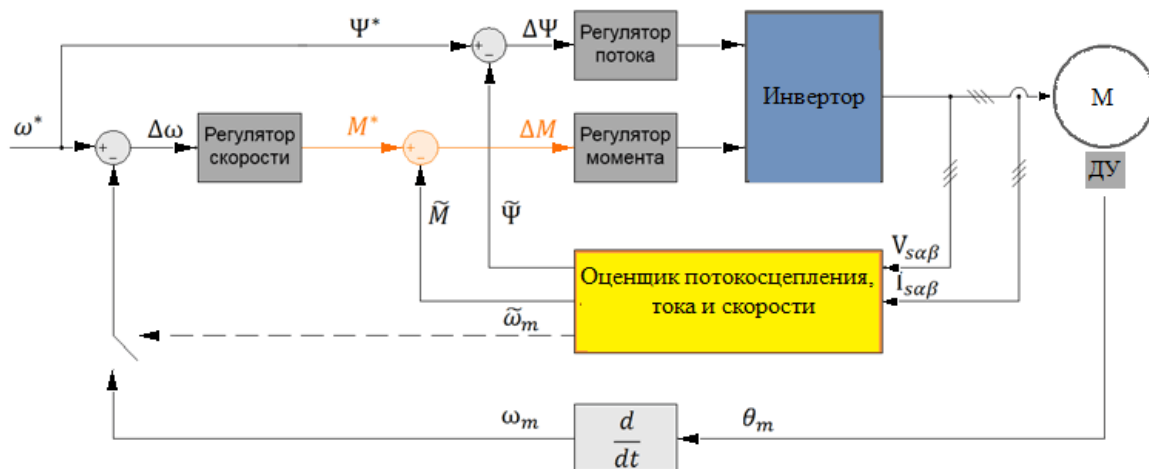


Рисунок 1.12 - Общая функциональная схема векторного управления.

Векторные уравнения электромагнитного момента приближены и не учитывают ряд факторов.

К ним можно отнести:

- учитываются только токовые составляющие;
- не учитывает нелинейность объекта управления;
- не учитывает магнитные и механические потери мощности;
- не учитывает изменение потокосцеплений в различных режимах работы.

В результате точность определения электромагнитного момента не высока и находится на уровне $\pm 10\%$ приведенной погрешности [13].

В работе поставлена задача повышения точности определения электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ по средствам энергетического метода управления тяговым электроприводом, изложенного в статье «Энергетический метод управления моментом тяговой синхронной машины» [14] и являющегося прототипом для технологии определения мгновенного электромагнитного момента тягового электропривода, применительно к асинхронным двигателям средней и высокой мощности. В его основу положено уравнение мгновенного баланса активной мощности электрических машин. Энергетический метод позволяет учесть недостатки алгоритмов векторного управления и повысить точность

определения $M_{ЭМ}$ в 3-4 раза. Достижение вышеуказанного уровня точности возможно при выполнении ряда определенных условий. Во-первых, прямое измерение мгновенной активной мощности $P_{1Н}$ и угловой скорости ω_H электрической машины должны находиться на уровне $\pm 1\%$. Во-вторых, номинальное КПД должно находиться в пределах $\eta_H = (90 \dots 95)\%$ [15,16,17]. Выполнение данного условия осуществимо, так как синхронные и асинхронные электрические машины средней и большой мощности, применяемые в тяговом электроприводе, имеют высокий номинальный КПД. В-третьих, в этом случае допуск на определение суммарных номинальных потерь мощности оказывается достаточно широким на уровне 10-15%, что позволяет определять их косвенным методом. В таком случае, возможно достижение точности определения момента на уровне $M_{ЭМН} \pm (2,5 \dots 3) \%$.

Ранее, концепция регулирования по мощности применялась к компенсаторам реактивной мощности, однако не использовалась для непосредственного управления электрической машиной. В трудах Беца [18] указывается аналогичный метод регулирования мгновенной и реактивной мощностью по потоку применительно к индукционным электрическим машинам. Но стоит отметить, что в его работе не была проведена оценка точностных характеристик данного метода, по которым можно было бы судить о качестве регулирования тяговым электроприводом.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24

2. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ УПРАВЛЕНИЯ

В трехфазных цепях электромеханических преобразователей нейтрального провода, как правило, нет. Это объясняется тем, что такие цепи симметричны. При необходимости, нейтральную клемму формируют искусственным способом. Блок информационно – измерительной системы тягового электропривода должен содержать как минимум: контроллер нагрузки – эталонную модель и по два датчика линейных напряжений и тока (рис.2.1 и рис.2.2)

Для повышения точности определения электромагнитного момента тягового электропривода необходимо определить алгоритм нахождения основных параметров системы, по которым непосредственно будет осуществляться ее контроль. Поэтому требуется выполнить задачу разработки алгоритмов, осуществляемых на базе энергетического метода, а также информационно – измерительной системы всего тягового электропривода. Кроме того, необходимо выяснить: возможно ли по результатам единичного измерения массива (2.4) первичных данных определить такие параметры электрической цепи как мгновенные значения амплитуд напряжения и тока U_{1m}, I_{1m} , реактивной мощности $Q_1(T_i^*)$, фазовых соотношений между гармониками напряжения и тока $\cos\varphi_1(T_i^*), \sin\varphi_1(T_i^*)$. Перечисленные данные необходимы для вычисления в мониторе контроллере нагрузки – эталонной модели суммарных потерь мощности электрических машин.

В основу энергетического метода входит уравнение мгновенного баланса активной мощности. Это уравнение для любой электрической машины в общем случае имеет следующий вид:

$$P_1(t) = M(t) \cdot \omega(t) + \sum \Delta P_i(t), \quad (2.1)$$

где $P_1(t)$ - потребляемая электрическая мощность;

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

$M(t)$ и $\omega(t)$ – вращающий момент и угловая скорость ротора электрической машины;

$\sum \Delta P_i(t)$ – суммарные потери мощности в процессе электромеханического преобразования энергии.

Заменяв механический момент на электромагнитный, получаем

$$M_{\text{эм}}(t) = \frac{P_1(t) - \sum \Delta P_i(t)}{\omega(t)}. \quad (2.2)$$

Для того чтобы реализовать в электроприводе обратную связь по электромагнитному моменту $M_{\text{эм}}$ в соответствии с алгоритмом (2.2), необходимо прямое измерение мощности P_1 и угловой скорости ω , а также косвенная оценка суммарных потерь $\sum \Delta P_i(t)$. Асинхронные электрические машины средней и большой мощности (30 - 315 кВт), применяемые в тяговом электроприводе, как было сказано ранее, имеют высокий номинальный КПД $\eta_n = (90 \dots 95)\%$. Моделирование точностных характеристик алгоритма (2.2) позволяет определить требования к информационной системе тягового электропривода. Предполагаем, что прямое измерение активной мощности и угловой частоты выполняется на уровне $P_{1н} \pm 1\%$ и $\omega_n \pm 1\%$, а КПД электрической машины находится в указанных пределах, то поле допуска на определение суммарных потерь косвенным методом оказывается достаточно широким и может достигать величины $(\sum \Delta P_i)_н \pm (10 \dots 15)\%$. При этом предполагаемая точность канала обратной связи по электромагнитному моменту будет находиться на уровне $M_{\text{эм.н}} \pm (2.5 \dots 3)\%$.

Решение поставленной задачи базируется на типовых измерительных устройствах (рис.2.1): импульсном датчике ДС угла поворота и угловой скорости ротора электрической машины и блоке измерительных преобразователей токов и напряжений трехфазной цепи между ПЧ (преобразователем частоты) и АМ (асинхронной машиной). Если задача измерения угловой скорости решается напрямую, то контроль мгновенной потребляемой мощности P_1 требует оригинальных алгоритмических решений.

										Лист
										26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

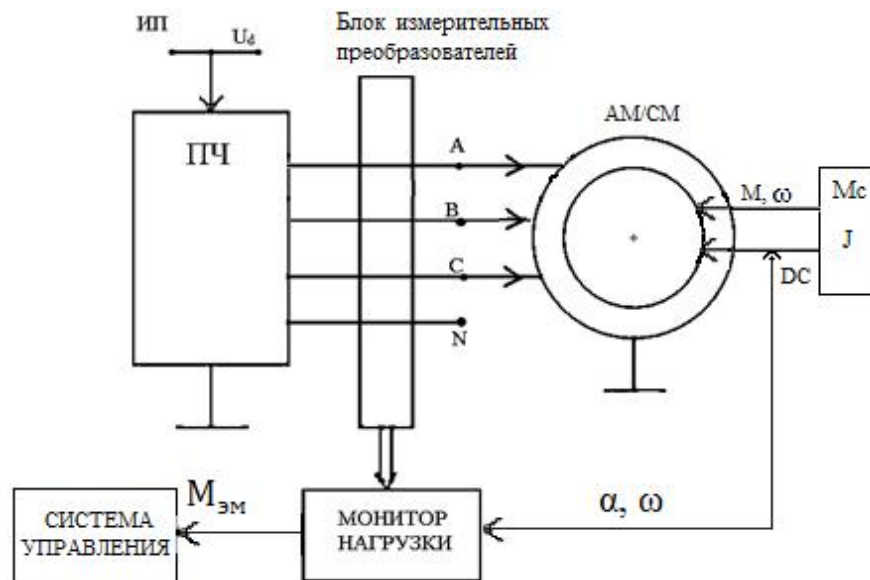


Рисунок 2.1 – Обобщенная функциональная схема информационно-измерительной системы тягового электропривода: ПЧ – преобразователь частоты; АМ/СМ – асинхронная/синхронная машина; ДС – датчик угла поворота и угловой скорости ротора; M_c , J – момент сопротивления и инерции нагрузки.

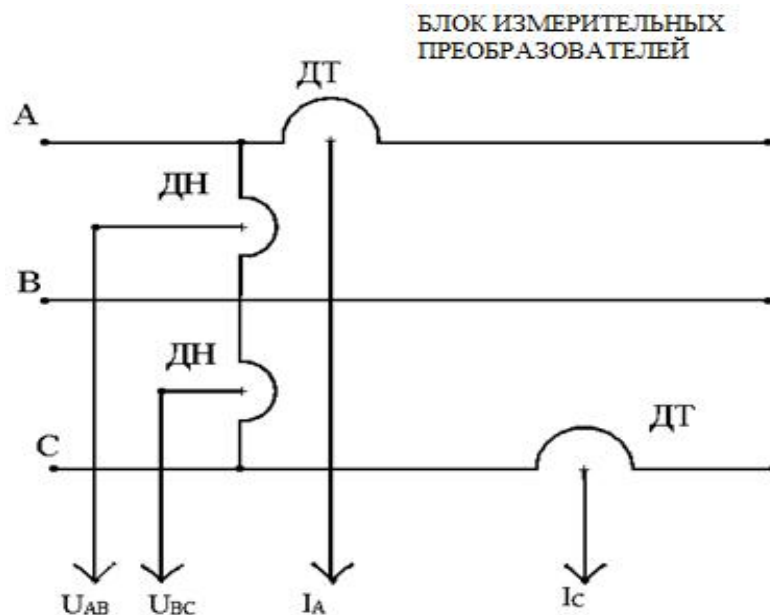


Рисунок 2.2 – Функциональная схема блока измерительных преобразователей: ДН – датчики напряжения; ДТ – датчики тока.

Основным носителем энергии между преобразователем частоты и электрической машиной являются первые гармоники токов и напряжений. Трехфазные токи, которые формируют ПЧ, близки по форме к синусоидальным.

Однако, напряжения на выходе ПЧ имеют импульсно-модулированный характер [19]. Первые гармоники напряжений необходимо выделять в мониторе нагрузки (рис.2.1) путем аналого-цифровой фильтрации сигналов датчиков напряжений ДН. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [20]. Будем считать, что задачи аналого-цифровой фильтрации первичной информации решены, поэтому обратимся к алгоритмам вычисления мощности $P_1(t)$ по первым гармоникам токов и напряжений.

Предположим, что в момент времени T_i^* (рис.2.3 и рис.2.4) выполняется опрос трехфазной цепи с помощью датчиков тока и напряжения и в мониторе нагрузки формируется массив первичных данных в виде мгновенных значений первых гармоник линейных токов и напряжений

$$\begin{pmatrix} i_A & i_C \\ u_{CA} & u_{AB} \end{pmatrix} T_i^* \quad (2.3)$$

Преобразуем его в массив фазных токов и напряжений:

$$\begin{pmatrix} i_A & i_B & i_C \\ u_{AN} & u_{BN} & u_{CN} \end{pmatrix} T_i^* \quad (2.4)$$

Учитывая взаимосвязь линейных и фазных величин

$i_B = -(i_A + i_C)$, $U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}$, $U_{BC} = U_{BN} - U_{CN}$, $U_{CA} = U_{CN} - U_{AN}$, формулы пересчета данных массива (2.4) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{AN} &= \frac{U_{BC} + 2 \cdot U_{AB}}{3} \\ U_{BN} &= \frac{U_{CA} + 2 \cdot U_{BC}}{3} \\ U_{CN} &= \frac{U_{AB} + 2 \cdot U_{CA}}{3} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (2.5)$$

Выясним возможность определения параметров электрической цепи по результатам единичного измерения массива (2.4) первичных данных.

Линейные напряжения и токи представлены в численно-аналитическом виде

$$\left. \begin{aligned} U_{AB}^* &= U_{mл}^* \sin(2\pi\Delta i - \pi) \\ U_{CA}^* &= U_{mл}^* \sin(2\pi\Delta i - \frac{4}{3}\pi) \\ i_A &= I_{m\phi}^* \sin(2\pi\Delta i + \frac{5}{6}\pi - \varphi_1) \\ i_C &= I_{m\phi}^* \sin(2\pi\Delta i - \frac{\pi}{2} - \varphi_1) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

где $U_{mл}^*$ и $I_{m\phi}^*$ - относительные амплитуды первой гармоники напряжений и токов;

$\Delta = \frac{\Delta t}{T}$ - шаг квантования;

$i=1 \dots N$ - текущий номер расчетной точки;

N - число расчетных точек на периоде T .

Расчеты выполнены при $U_{mл}^* = I_{m\phi}^* = 1$ и $N = 1000$.

По данным выше формулам построим графики зависимостей токов и напряжений от времени (см. рис.2.3 и рис.2.4).

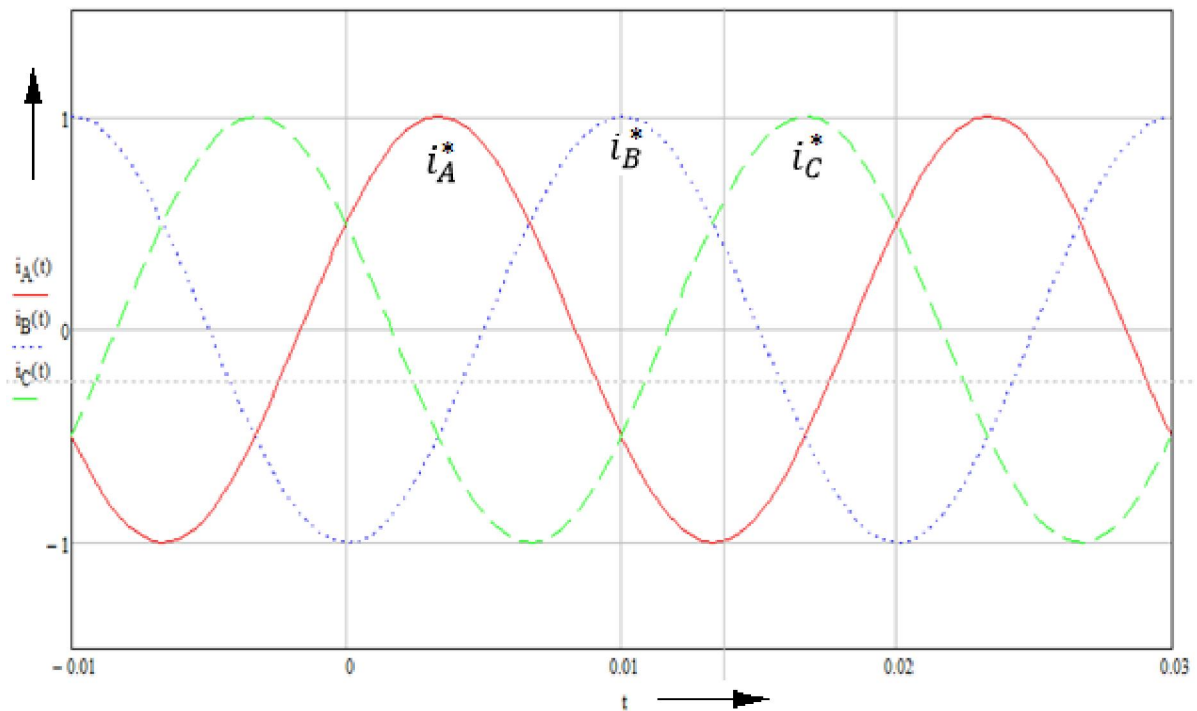


Рисунок 2.3 – График первых гармоник фазных токов в симметричной

трехфазной цепи: $i_A^* = \frac{i_A}{I_{m\phi}}$; $i_B^* = \frac{i_B}{I_{m\phi}}$; $i_C^* = \frac{i_C}{I_{m\phi}}$.

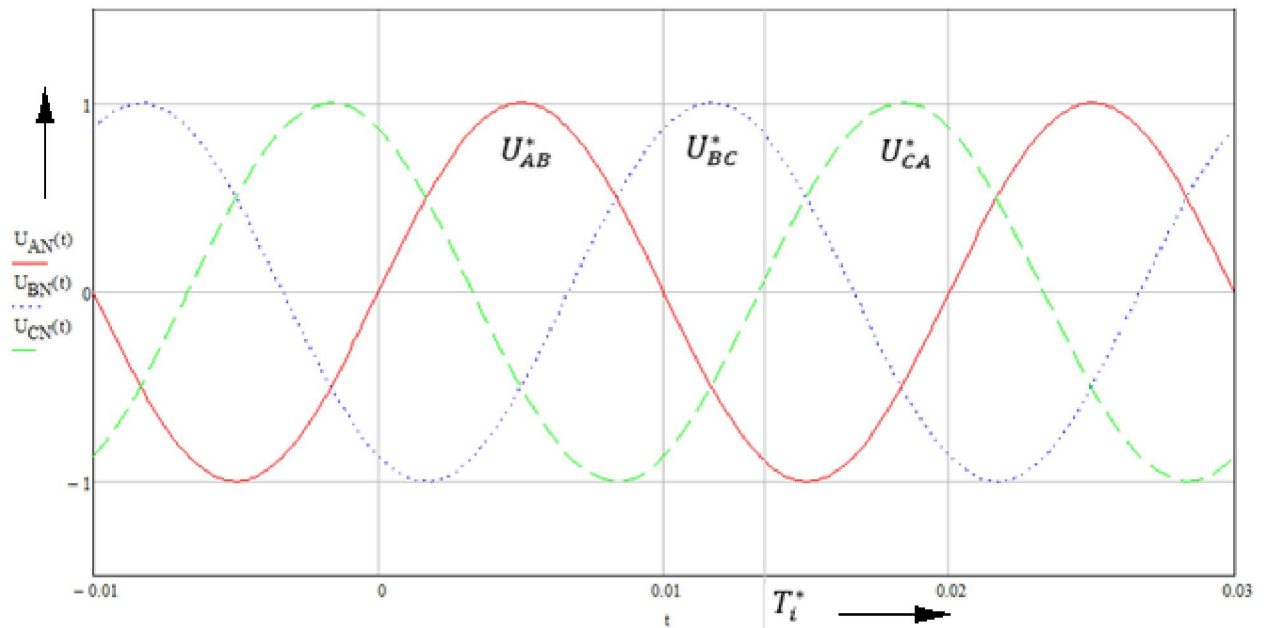


Рисунок 2.4 – Графики первых гармоник линейных напряжений симметричной трехфазной цепи: $U_{AB}^* = \frac{U_{AB}}{U_{мл}}$; $U_{BC}^* = \frac{U_{BC}}{U_{мл}}$; $U_{CA}^* = \frac{U_{CA}}{U_{мл}}$; $T^* = \frac{t}{T}$, где T - период.

Обработку данных массива (2.4) выполним по технологии обобщенного энергетического потока трехфазных электромеханических преобразователей [21,22]. Вычисляем обобщенные ток и напряжение трехфазной цепи:

$$\left. \begin{aligned} U_1^2(T_i^*) &= (U_{AN}^2 + U_{BN}^2 + U_{CN}^2)_{T_i^*} \\ I_1^2(T_i^*) &= (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)_{T_i^*} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Вычисляем амплитуды первых гармоник фазных токов и напряжений:

$$I_{1m}^2(T_i^*) = 1,5I_1^2(T_i^*), \quad (2.8)$$

$$U_{1m}^2(T_i^*) = 1,5U_1^2(T_i^*). \quad (2.9)$$

Вычисляем мгновенную активную мощность

$$P_1(T_i^*) = (U_{AN}i_A + U_{BN}i_B + U_{CN}i_C)_{T_i^*}. \quad (2.10)$$

А также мгновенный коэффициент мощности

$$\cos\varphi_1(T_i^*) = \frac{P_1(T_i^*)}{U_1(T_i^*)I_1(T_i^*)}, \quad (2.11)$$

Определяем $\sin\varphi_1$ с учетом знака фазового угла φ_1 между первыми гармониками напряжения и тока:

$$\sin\varphi_1(T_i^*) = \left(\frac{\sqrt{3}(\delta U_a \cos\varphi_1 - \delta i_a)}{2(\delta U_B + 0,5\delta U_a)} \right) T_i^*, \quad (2.12)$$

где $\delta U_a = U_{AN}/U_{1m}$, $\delta U_B = U_{BN}/U_{1m}$, $\delta i_a = i_A/I_{1m}$ - относительные величины фазных токов и напряжений. Алгоритм (2.12) получен для прямой последовательности чередования фаз. При этом угол φ_1 не должен превышать 90° .

Вычисляем мгновенную реактивную мощность

$$Q_1(T_i^*) = U_1(T_i^*)I_1(T_i^*)\sin\varphi_1(T_i^*). \quad (2.13)$$

По данным уравнений (2.6) проведено моделирование трехфазной симметричной цепи с нулевым проводом. Для каждого момента времени $T_i^* = 2\pi\Delta i$ выполнена процедура создания массива первичных данных (2.3) и (2.4), вычисления обобщенных напряжений и токов (2.7), активной мощности (2.10), амплитуд (2.8) и (2.9), фазовых соотношений (2.11) и (2.12) и реактивной мощности (2.13). Моделирование показало, что результаты вычисления искомых параметров не зависят от момента измерения T_i^* . Относительные погрешности вычисления параметров синусоидальных функций (амплитуд токов и напряжений и фазовых углов) по данным массивов (2.3) и (2.4) практически равны нулю ($\delta I \approx 0,1\%$; $\delta U \approx 0,01\%$; $\delta\varphi \approx 0,01\%$).

Разработана функциональная схема и алгоритмы работы информационно-измерительной системы тягового электропривода, предназначенной для формирования обратной связи по электромагнитному моменту $M_{ЭМ}$ для асинхронной электрической электрической машины. Показано, что прямое измерение параметров трехфазной цепи с помощью блока первичных датчиков, осуществляемое между преобразователем частоты и электрической машиной, позволяет, при соответствующих алгоритмах обработки первичной информации, получить массив данных в виде мгновенных значений амплитуд первой гармоники напряжений и токов, их фазовых соотношений, суммарной, активной и реактивной мощности. Определены предполагаемые требования к измерительным устройствам

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

с целью реализации обратной связи по электромагнитному моменту на прогнозируемом уровне (2,5...3) % приведенной погрешности.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		32

3. МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИМ ДАННЫМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В качестве критерия правильного подбора значений активных и реактивных сопротивлений двигателя, воспользуемся уравнением невязки. Невязка приближенного решения - одна из характеристик качества приближенного решения \bar{u} операторного уравнения $P(u) = 0$.

Невязкой называют величину $P(\bar{u})$ или некоторую ее норму. Если известна оценка $\|u_1 - u_2\|_1 \leq C \|P(u_1) - P(u_2)\|_2$, то погрешность решения можно оценить через невязку

$$\|\bar{u} - u\|_1 \leq C \|P(\bar{u})\|_2. \quad (3.1)$$

Если такой оценки нет, то невязка является косвенной характеристикой качества приближенного решения. Чем точнее определены параметры уравнения, тем меньше значение уравнения невязки (стремиться к нулю) [23]. Основными параметрами, входящими в состав уравнения, являются номинальный ток статора $I_{1Н}$, $\sin\varphi_{1Н}$ и КПД двигателя $\eta_{Н}$.

Для выбранного ранее асинхронного двигателя были сняты следующие характеристики в номинальном режиме: номинальное напряжение питания двигателя $U_{1Н}$ равно 660 В, номинальный ток статора $I_{1НЭ}$ равен 246.3 А, номинальный $\cos\varphi_{1НЭ}$ равен 0.89, КПД $\eta_{НЭ} = 0.915$, мощность двигателя $P_{НЭ} = 132$ кВт, номинальный момент на валу $M_{НЭ} = 428,088$ Нм, $\sin\varphi_{1НЭ} = 0.456$ и значение номинального скольжения равно 0.018. Также, даны грубые значения активных и реактивных сопротивлений двигателя: $R_0 = 4.84$ Ом, $R_1 = 0.055$ Ом, $R_2 = 0.043$ Ом; $X_0 = 17.1$ Ом, $X_1 = 0.45$ Ом, $X_2 = 0.46$ Ом. Требуется уточнить параметры модели.

T – образная схема замещения асинхронного двигателя, необходимая для дальнейших расчетов, представлена на рис.3.1.

										Лист
										33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР					

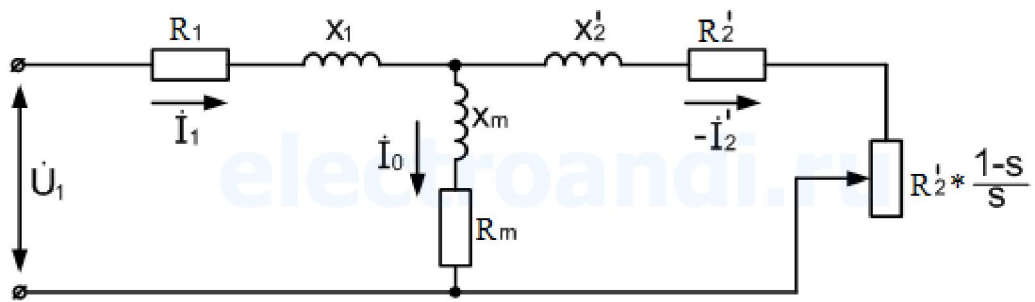


Рисунок 3.1 – Т - образная схема замещения асинхронного двигателя.

Для начала найдем степень точности определяемых характеристик двигателя с использованием в расчете грубых значений параметров сопротивлений.

Для этого применим следующий алгоритм расчета.

1. Найдем полное сопротивление статора, ротора и намагничивающей части двигателя

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2 &= \frac{R_2}{S_H} + jX_2 \\ Z_0 &= R_0 + jX_0 \end{aligned} \right\} \cdot \quad (3.2)$$

Подставив значения сопротивлений, получим

$$Z_1 = 0.055 + 0.45j \text{ Ом}$$

$$Z_2 = 2.389 + 0.46j \text{ Ом}$$

$$Z_0 = 4.84 + 17.1j \text{ Ом}$$

Тогда напряжение U_0 равно

$$\dot{U}_0 = \frac{U_{1H}}{1 + \frac{Z_1 + Z_1}{Z_0 + Z_2}} \quad (3.3)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{660}{1 + \frac{0.055 + 0.45j}{4.84 + 17.1j} + \frac{0.055 + 0.45j}{2.389 + 0.46j}} = 593.128 - 99.339j \text{ В.}$$

2. Ток в статоре найдем как сумму токов ротора и намагничивающей части двигателя

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2, \quad (3.4)$$

где токи ротора и намагничивающей части равны

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= \frac{U_0}{Z_2} \\ I_0 &= \frac{U_0}{Z_0} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

А их модули соответственно

$$\begin{aligned} I_2 &= 247.203 \text{ A} \\ I_0 &= 33.84 \text{ A} \\ I_1 &= 235.399 - 119.833j \end{aligned}$$

Тогда модуль тока статора равен

$$I_1 = 264.145 \text{ A}$$

3. Из формулы тока $I_1 = I_1 e^{j\varphi_1}$ найдем значение $\cos\varphi_1$

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \frac{\operatorname{Re}(I_1)}{I_1} \\ \cos\varphi_1 &= \frac{235.399}{264.145} = 0.891 \end{aligned} \quad (3.6)$$

В таком случае угол $\varphi_1 \approx 27^\circ$, а $\sin\varphi_1 = 0.45$.

4. Формулы для расчета активной и реактивной мощности выглядят следующим образом

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \\ Q_1 &= U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Подставив значения получим

$$\begin{aligned} P_1 &= 660 \cdot 264.145 \cdot 0.891 = 155.4 \text{ кВт} \\ Q_1 &= 660 \cdot 264.145 \cdot 0.45 = 79.1 \text{ кВар.} \end{aligned}$$

5. Произведем проверку баланса мощностей через оптимизированные значения сопротивлений по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= I_1^2 \cdot R_1 + I_0^2 \cdot R_0 + I_2^2 \frac{R_2}{S_H} \\ Q_1 &= I_1^2 \cdot X_1 + I_0^2 \cdot X_0 + I_2^2 \cdot X_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

$$P_1 = 264.145^2 \cdot 0.055 + 33.84^2 \cdot 4.84 + 247.203^2 \cdot \frac{0.043}{0.018} = 155.4 \text{ кВт}$$

$$Q_1 = 264.145^2 \cdot 0.45 + 33.84^2 \cdot 17.1 + 247.203^2 \cdot 0.46 = 79.1 \text{ кВар.}$$

6. Активная мощность на валу двигателя равна

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 \frac{1-S_H}{S_H} \quad (3.9)$$

$$P_2 = 247.203^2 \cdot 0.043 \cdot \frac{1 - 0.018}{0.018} = 143.4 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные номинальные потери в двигателе находятся по формуле

$$\sum \Delta P_H = I_1^2 \cdot R_1 + I_0^2 \cdot R_0 + I_2^2 \cdot R_2 \quad (3.10)$$

Подставив в формулу получившиеся значения получим

$$\sum \Delta P_H = 264.145^2 \cdot 0.055 + 33.84^2 \cdot 4.84 + 247.203^2 \cdot 0.043 = 12.01 \text{ кВт.}$$

8. Тогда электромагнитный момент

$$M_H = \frac{P_1 - \sum \Delta P_H}{\omega}, \quad (3.11)$$

где $\omega = \omega_0 \cdot (1 - S_H) = 308,35$, при $\omega_0 = 314$ ($f = 50$ Гц).

$$M_H = \frac{155.4 - 12.01}{308.35} = 464.916 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

9. А коэффициент полезного действия равен

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.12)$$

Подставив значения активных мощностей в формулу получаем

$$\eta_H = \frac{143.4}{155.4} = 0.923.$$

Определим отклонение интересующих нас показателей.

$$\delta I_1 = \frac{264.15 - 246}{246} \cdot 100\% = 7.38\%$$

$$\delta \cos \varphi_1 = \frac{0.891 - 0.89}{0.89} \cdot 100\% = 0.112\%$$

$$\delta P_2 = \frac{143.4 - 132}{132} \cdot 100\% = 8.64\%$$

$$\delta \eta = \frac{0.923 - 0.915}{0.915} \cdot 100\% = 0.87\%$$

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

$$\delta M = \frac{464.92 - 428}{428} \cdot 100\% = 8.63\%$$

При этом уравнение невязки имеет следующий вид

$$\sum \Delta_i = \left(\frac{I_1 - I_{1нэ}}{I_{1нэ}} \right)^2 - \left(\frac{\sin \varphi_1 - \sin \varphi_{1нэ}}{\sin \varphi_{1нэ}} \right)^2 - \left(\frac{\eta - \eta_{нэ}}{\eta_{нэ}} \right)^2 \quad (3.13)$$

Тогда для грубой настройки параметров

$$\sum \Delta_i = \left(\frac{264.15 - 246}{246} \right)^2 - \left(\frac{0.45 - 0.456}{0.456} \right)^2 - \left(\frac{0.923 - 0.915}{0.915} \right)^2 = 0.24$$

Полученные данные показывают достаточно сильные отклонения по таким параметрам как ток статора, полезная мощность и момент. Для уменьшения отклонения по представленным параметрам и повышения точности определения основных характеристик двигателя, воспользуемся методами оптимизации параметров системы.

Выбор способа настройки математической модели

Оптимизация — в математике, информатике и исследовании операций задача нахождения экстремума (минимума или максимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства, ограниченной набором линейных и/или нелинейных равенств и/или неравенств.

В процессе проектирования ставится обычно задача определения наилучших, в некотором смысле, структуры или значений параметров объектов. Такая задача называется оптимизационной. Если оптимизация связана с расчётом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта, то она называется параметрической оптимизацией. Задача выбора оптимальной структуры является структурной оптимизацией.

Стандартная математическая задача оптимизации формулируется таким образом. Среди элементов χ , образующих множества X , найти такой элемент χ^* , который доставляет минимальное значение $f(\chi^*)$ заданной функции $f(\chi)$. Для того, чтобы корректно поставить задачу оптимизации, необходимо задать:

						<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	Лист
							37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

1. Допустимое множество-множество $X = \{\vec{x} | g_i(\vec{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \in R^n$;
2. Целевую функцию - отображение $f: X \rightarrow R$;
3. Критерий поиска (max или min).

Тогда решить задачу $f(\vec{x}) \rightarrow \min_{x \in X}$ означает одно из:

1. Показать, что $X = \emptyset$;
2. Показать, что целевая функция $f(\vec{x})$ не ограничена снизу.
3. Найти $\vec{x}^* \in X : f(\vec{x}^*) = \min_{x \in X} f(\vec{x})$.
4. Если $\nexists \vec{x}^*$ то найти $\inf_{x \in X} f(\vec{x})$

Если минимизируемая функция не является выпуклой, то часто ограничиваются поиском локальных минимумов и максимумов: точек x_0 таких, что всюду в некоторой их окрестности $f(x) \geq f(x_0)$ для минимума и $f(x) \leq f(x_0)$ для максимума.

Если допустимое множество $X = R^n$, то такая задача называется задачей безусловной оптимизации, в противном случае — задачей условной оптимизации.

Классификация методов оптимизации

Общая запись задач оптимизации задаёт большое разнообразие их классов. От класса задачи зависит подбор метода (эффективность её решения). Классификацию задач определяют: целевая функция и допустимая область (задаётся системой неравенств и равенств или более сложным алгоритмом).

Методы оптимизации классифицируют в соответствии с задачами оптимизации:

- Локальные методы: сходятся к какому-нибудь локальному экстремуму целевой функции. В случае унимодальной целевой функции, этот экстремум единственен, и будет глобальным максимумом/минимумом.
- Глобальные методы: имеют дело с многоэкстремальными целевыми функциями. При глобальном поиске основной задачей является выявление тенденций глобального поведения целевой функции.

По требованиям к гладкости и наличию у целевой функции частных производных, их также можно разделить на:

										Лист
										38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

- прямые методы, требующие только вычислений целевой функции в точках приближений;
- методы первого порядка: требуют вычисления первых частных производных функции;
- методы второго порядка: требуют вычисления вторых частных производных, то есть гессиана целевой функции.

Наиболее подходящим по скорости нахождения экстремума и удобству использования будем считать метод первого порядка, а именно метод градиентного спуска.

Из курса математики известно, что направление наибольшего возрастания функции характеризуется ее градиентом. Если критерий оптимизации задан уравнением: $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то его градиент в некоторой точке O (из $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ области определения функции) определяется вектором:

$$\nabla f \equiv \text{grad}f(O) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(O), \frac{\partial f}{\partial x_2}(O), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(O) \right) \quad (3.14)$$

Градиентный спуск — метод нахождения локального экстремума (минимума или максимума) функции с помощью движения вдоль градиента. Для минимизации функции в направлении градиента используются методы одномерной оптимизации, например, метод золотого сечения. Также можно искать не наилучшую точку в направлении градиента, а какую-либо лучше текущей.

В этом случае частные производные в точке O находят приближенными методами.

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(O) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)}{\Delta x_i}(O) \quad (3.15)$$

где Δ - бесконечно малое приращение (1 - 5% от значения i - ой переменной).

Пусть функция $f(x)$ такова, что можно вычислить ее градиент. Тогда можно применить метод градиентного спуска.

Наряду с определением градиентного вектора основным вопросом, решаемым в методах градиента, является выбор шага движения по градиенту. Выбор величины шага в значительной степени зависит от вида поверхности. Если шаг слишком мал, это потребует продолжительных расчетов. Если наоборот размеры шага слишком велики, можно проскочить оптимум.

Метод градиентного спуска делится на несколько видов:

- Метод градиентного спуска с постоянным шагом
- Метод градиентного спуска с дроблением шага
- Метод наискорейшего спуска

При использовании градиентного метода в задачах оптимизации основной объем вычисления приходится обычно на вычисление градиента целевой функции в каждой точке траектории спуска. Поэтому целесообразно уменьшить количество таких точек без ущерба для самого решения. Это достигается в методе Коши (наискорейшего спуска). Согласно этому методу, после определения направления поиска оптимума в начальной точке, в этом направлении делают не один шаг, а двигаются до тех пор, пока происходит улучшение функции, достигая таким образом, экстремума в некоторой точке. В этой точке вновь определяют направление поиска (с помощью градиента) и ищут новую точку оптимума целевой функции и т.д. (см. рис.3.2а). В этом методе поиск происходит более крупными шагами, и градиент функции вычисляется в меньшем числе точек (см. рис.3.2б). Заметим, что метод наискорейшего спуска сводит многомерную задачу оптимизации к последовательности одномерных задач оптимизации, которые могут решаться, например, методом золотого сечения или половинного деления.

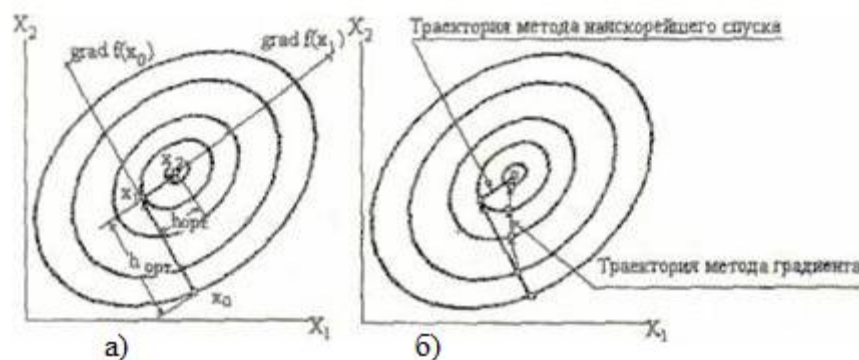


Рисунок 3.2 – Метод градиента поиска: а) поиск максимума с выбором оптимального шага; б) сравнение метода наискорейшего спуска с методом градиента с постоянным шагом.

Настройка модели по методу наискорейшего спуска

По результатам анализа приведенных методов нахождения оптимума, выявлено, что метод градиента с постоянным шагом не позволяет достаточно точно определить минимальное значение уравнения невязки и, как следствие, значения полученных параметров двигателя далеки от оптимального значения.

В связи с этим в работе выбран и промоделирован метод наискорейшего спуска, который позволяет при минимальном количестве операций, максимально быстро достичь требуемого уровня точности.

Применим метод наискорейшего спуска, используя следующий алгоритм.

1. Изменим заданные грубые значения сопротивлений на ~5% таким образом, чтобы суммарное отклонение изменялось в сторону его уменьшения. Получим значения, представленные в табл.3.1.

Таблица 3.1 - Значения сопротивлений двигателя, с учетом отклонения.

X_0 , Ом	R_0 , Ом	X_1 , Ом	R_1 , Ом	X_2 , Ом	R_2 , Ом
17.955	5.082	0.428	0.058	0.437	0.045

2. Определим коэффициент влияния каждого параметра равный отношению отклонения суммарного показателя к отклонению i -го параметра

$$k_i = \frac{\sum \Delta_{iH} - \sum \Delta_{iK}}{\Delta_i} \quad (3.16)$$

Полученные значения коэффициентов влияния представлены в табл.3.2.

Таблица 3.2 – Коэффициенты влияния параметров.

k_{X0}	k_{R0}	k_{X1}	k_{R1}	k_{X2}	k_{R2}
0.12	$2 \cdot 10^{-4}$	0.143	$3.462 \cdot 10^{-3}$	0.16	0.494

3. Найдем шаг изменения параметров системы с учетом направления движения в сторону уменьшения суммарного показателя. Для этого возьмем степень изменения параметров системы равную 0.1% и поделим ее на коэффициент влияния

$$\Delta k_i = \frac{0.001}{k_i} \quad (3.17)$$

Значения шагов для каждого показателя системы представлены в табл.3.3.

Таблица 3.3 - Значения шагов показателей системы.

Δk_{X0}	Δk_{R0}	Δk_{X1}	Δk_{R1}	Δk_{X2}	Δk_{R2}
$8.333 \cdot 10^{-3}$	$6.984 \cdot 10^{-3}$	$6.25 \cdot 10^{-3}$	5	0.289	$2.022 \cdot 10^{-3}$

4. Далее, к значениям сопротивлений из табл.3.1 последовательно прибавляем значение k-го шага из табл.3.3 до тех пор, пока значение $\sum \Delta_i$ не приобретет минимальный показатель (экстремум) и снова не начнет увеличиваться. Результаты проделанных расчетов представлены в табл.3.4.

Таблица 3.4 – Значения базовых показателей двигателя для k-го шага.

k	$\sum \Delta_i$	I_{1H}, A	$\cos \varphi_{1H}$	$P_{2H}, кВт$	η_H	$M_H, Нм$
1	0.187	252.64	0.907	138.6	0.925	428.09
2	0.179	250.93	0.909	137	0.923	444.26
3	0.172	249.24	0.911	135.4	0.917	439.2
4	0.165	247.56	0.913	133.9	0.912	434.2
5	0.158	245.9	0.915	132.4	0.901	429.3
6	0.161	244.26	0.917	130.9	0.892	424.46

Из табл.3.4 можно видеть, что для пятого шага (k=5) суммарное отклонение $\sum \Delta_i$ имеет минимальное значение. Более того, значения базовых показателей системы близки к значениям экспериментальных данных. А, следовательно, погрешности модели по этим показателям (см. табл.3.5) будут минимальными.

Таблица 3.5 – Погрешности модели по базовым показателям.

Показатель		$I_{1н}$	$\cos\varphi_{1н}$	$P_{2н}$	$\eta_{н}$	$M_{н}$
Отклонение, %	Грубая настройка	7.38	0.112	8.64	0.874	8.63
	Оптимальная настройка	0.041	2.8	0.303	1.53	0.304

Таким образом, параметры энергетической модели представлены в табл.3.6.

Таблица 3.6 – Параметры энергетической модели.

Параметр	R_0 , Ом	X_0 , Ом	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R_2 , Ом	X_2 , Ом
Грубая настройка	4.84	17.1	0.055	0.45	0.043	0.46
Оптимальная настройка	5.082	17.955	0.141	0.413	0.046	0.423

Разработка энергоэффективного управления электрической машиной

Для разработки энергоэффективного управления электрической машиной при малых нагрузках, выполним расчеты асинхронного двигателя для различных значений скольжений $S_{н} = \text{var}$. Данные результаты будут являться основанием для продолжения научной деятельности в этом направлении, так как проблема точного определения электромагнитного момента при различном уровне нагрузки остается сложной задачей. Кроме того, энергоэффективное управление электрической машиной предполагает возможность поддержания коэффициента полезного действия на уровне выше или равном номинальному значению.

Результаты расчетов по критерию изменения значения скольжения $S_{н} = \text{var}$ представлены в виде таблицы (см. табл.3.7).

Таблица 3.7 – Характеристики двигателя для различных значений скольжений.

S_H	I_0, A	I_1, A	I_2, A	$\Sigma \Delta P_H,$ кВт	$P_2,$ кВт	$P_1,$ кВт	η	$M_{ЭМ},$ Н·м	$Q,$ кВар
0.001	34.455	40.661	13.976	6.275	8.98	15.25	0.59	28.62	22.08
0.002	34.341	50.101	27.857	6.383	17.81	24.19	0.74	56.84	22.54
0.003	34.219	61.279	41.628	6.56	26.49	33.05	0.802	84.62	23.31
0.004	34.091	73.33	55.281	6.805	35	41.81	0.84	111.92	24.38
0.005	33.957	85.817	68.802	7.116	43.33	50.45	0.86	138.7	25.75
0.006	33.816	98.507	82.183	7.49	51.47	58.96	0.87	164.91	27.4
0.007	33.67	111.268	95.412	7.93	59.4	67.33	0.88	190.52	29.32
0.008	33.518	124.02	108.483	8.42	67.13	75.55	0.89	215.51	31.5
0.009	33.362	136.706	121.386	8.97	74.63	83.6	0.893	239.84	33.93
0.010	33.2	149.293	134.144	9.572	81.91	91.48	0.895	263.5	36.6
0.011	33.034	161.753	146.66	10.22	88.96	99.18	0.897	286.45	39.5
0.012	32.865	174.066	159.017	10.92	95.77	106.7	0.898	308.7	42.6
0.013	32.691	186.219	171.181	11.67	102.3	144	0.898	330.21	45.9
0.014	32.515	198.192	183.147	12.45	108.7	121.1	0.897	351	49.4
0.015	32.335	209.984	194.91	13.28	114.8	128	0.896	371	53.05
0.016	32.153	221.584	206.467	14.14	120.6	134.7	0.895	390.3	56.87
0.017	31.968	232.986	217.816	15.03	126.2	141.2	0.894	408.84	60.84
0.018	31.782	244.185	228.953	15.95	131.5	147.5	0.892	426.63	64.94
0.019	31.594	255.178	239.878	16.9	136.7	153.6	0.89	443.66	69.16

Полученные значения в относительных единицах (относительно номинала) представлены в виде графиков рис.3.3.

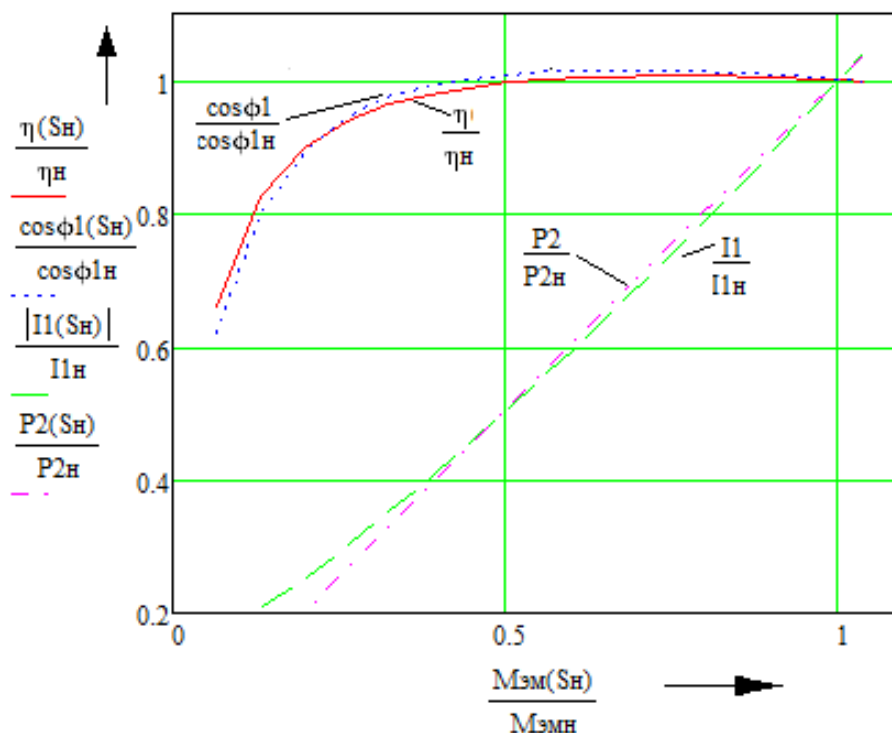


Рисунок 3.3 – Графики электромеханических характеристик двигателя для различных значений скольжений в относительных единицах.

Выполним аналогичные расчеты характеристик асинхронного двигателя для различных значений напряжения $U_1 = var$, с шагом $\Delta U = 50$ В.

Расчет выполняется при двух изменяющихся параметрах:

$$R_0 = R_{0н} \left(1 + \frac{U_1}{U_{1н}}\right) \cdot 0.5 \quad (3.18)$$

$$X_0 = X_{0н} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)^2}\right], \quad (3.19)$$

где $R_{0н} = 5,082$ Ом и $X_{0н} = 17.955$ Ом.

Результаты вычислений представлены в табл.3.8.

Таблица 3.8 – Характеристики двигателя для различных значений напряжений.

$U_1, В$	60	110	160	210	260	310	360	410	460	510	560	610	660
$X_0, Ом$	35.836	35.66	35.37	34.977	34.458	33.806	33	32.025	30.831	29.352	27.457	24.81	17.955
$R_0, Ом$	2.772	2.97	3.157	3.35	3.542	3.735	3.93	4.12	4.312	4.505	4.7	4.89	5.082
$I_0, А$	1.516	2.792	4.091	5.426	6.813	8.271	9.827	11.516	13.394	15.558	18.195	21.8	31.782
$I_1, А$	21.448	39.338	57.247	75.177	93.136	111.13	129.171	147.274	165.466	183.794	202.354	221.415	244.185
$I_2, А$	21.036	38.563	56.085	73.602	91.11	108.606	126.087	143.546	160.975	178.358	195.667	212.82	228.953
$\sum \Delta P_H,$ кВт	0.092	0.309	0.66	1.145	1.769	2.539	3.463	4.552	5.826	7.317	9.09	11.32	15.952
$P_2, кВт$	1.11	3.732	7.894	13.595	20.832	29.601	39.897	51.71	65.03	79.833	96.079	113.664	131.55
$P_1, кВт$	1.202	4.042	8.554	14.74	22.601	32.14	43.36	56.263	70.856	87.15	105.169	124.983	147.501
η	0.924	0.923	0.923	0.922	0.922	0.921	0.92	0.919	0.918	0.916	0.914	0.909	0.892
$M_{ЭМ}, Н \cdot м$	3.601	12.103	25.601	44.089	67.559	95.998	129.388	167.702	210.898	258.906	311.594	368.622	426.627
$Q_1, кВт$	0.46	1.546	3.276	5.655	8.693	12.403	16.803	21.921	27.8	34.512	42.196	51.197	64.935

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

Лист

46

Полученные значения показателей двигателя при различных значениях напряжения в относительных единицах (относительно номинала) представлены в виде графиков на рис.3.4.

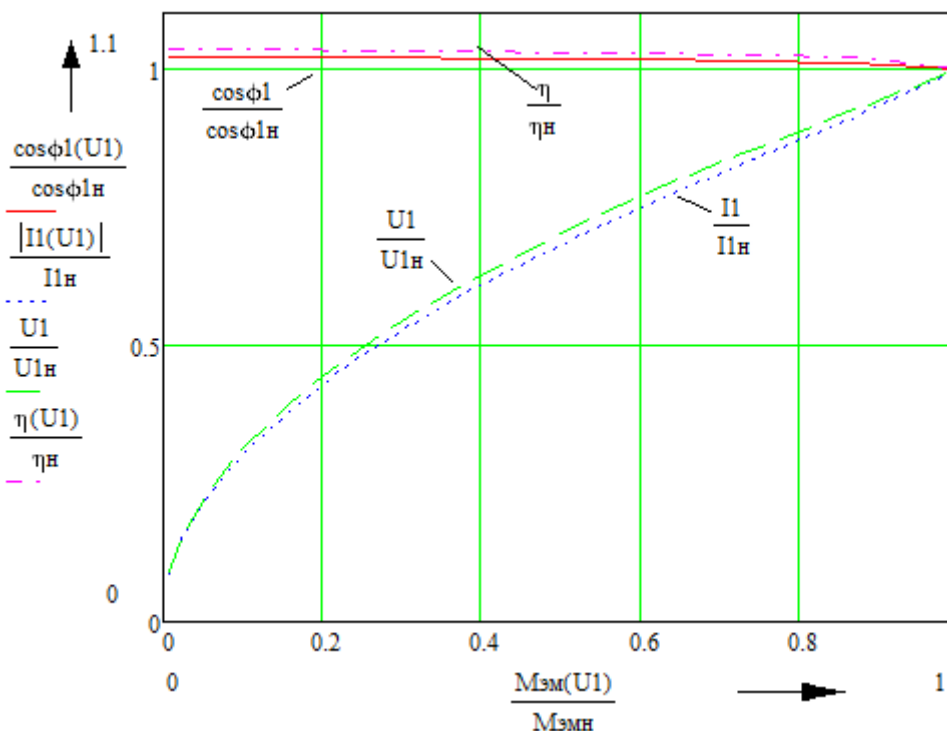


Рисунок 3.4 – Электромеханические характеристики двигателя для различных значений напряжения.

Расчет энергетических характеристик по критерию $C_M = const$.

Произведем расчет энергетических характеристик двигателя по критерию $C_M = const$.

1. Расчет коэффициентов

$$\Delta = R_2 \cdot X_{0H} - R_{0H} \cdot X_2 \cdot S_H \quad (3.20)$$

$$\Delta = 0.046 \cdot 17.955 - 5.082 \cdot 0.423 \cdot 0.018 = 0.787$$

$$A_2 = (X_{0H} \cdot \cos\varphi_1 - R_{0H} \cdot \sin\varphi_1) \cdot \frac{S_H}{\Delta} \quad (3.21)$$

$$A_2 = (17.955 \cdot 0.915 - 5.082 \cdot 0.403) \cdot \frac{0.018}{0.787} = 0.329$$

$$B_2 = (R_1 \cdot X_{0H} - R_{0H} \cdot X_1) \cdot \frac{S_H}{\Delta} \quad (3.22)$$

$$B_2 = (0.141 \cdot 17.955 - 5.082 \cdot 0.413) \cdot \frac{0.018}{0.787} = 9.9 \cdot 10^3$$

2. Расчет коэффициентов C_M по данным номинального режима

$$M_{XH} = \frac{R_2(1-S_H)}{\omega_H \cdot S_H} \cdot \frac{A_2^2 \cdot U_{1H}^2}{4 \cdot B_2} \quad (3.23)$$

$$M_{XH} = \frac{0.046(1 - 0.018)}{308 \cdot 0.018} \cdot \frac{0.329^2 \cdot 660^2}{4 \cdot 9.9 \cdot 10^3} = 9.684 \cdot 10^3$$

$$M_H = \frac{R_2(1-S_H)}{\omega_H \cdot S_H} \cdot (A_2 \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} - B_2 \cdot I_{1H}^2) \quad (3.24)$$

$$M_H = \frac{0.046(1 - 0.018)}{308 \cdot 0.018} \cdot (0.329 \cdot 660 \cdot 244.2 - 9.9 \cdot 10^3 \cdot 244.2^2) = 426.5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда критерий C_M будет вычисляться следующим образом

$$\left. \begin{aligned} C_M &= \frac{M_H}{M_{XH}} \\ C_{M*} &= 1 + \sqrt{1 - C_M} \\ C_{M**} &= \frac{2 \cdot C_{M*} - C_M}{C_M} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

$$C_M = \frac{426.5}{9.684 \cdot 10^3} = 0.044$$

$$C_{M*} = 1 + \sqrt{1 - 0.044} = 1.978$$

$$C_{M**} = \frac{2 \cdot 1.978 - 0.044}{0.044} = 88.814.$$

3. Расчет зависимостей по критерию $C_M = \text{const}$.

Проведем расчет двигателя для условий $S_H = \text{const}, U_1 = \text{var}$.

Подобный расчет позволяет определять зависимость основных параметров двигателя от значения напряжения. Данный критерий помогает отразить чувствительность этих параметров к изменению напряжения питания двигателя.

Результаты расчетов представлены в виде таблицы (см.табл.3.9).

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4.8

Таблица 3.9 – Характеристики двигателя по данным расчета $C_M = \text{const}$.

$U_1, \text{В}$	60	110	160	210	260	310	360	410	460	510	560	610	660
$X_0,$ Ом	35.836	35.659	35.374	34.977	34.458	33.806	33.004	32.025	30.831	29.352	27.457	24.81	17.955
$R_0,$ Ом	2.772	2.965	3.157	3.349	3.542	3.735	3.927	4.119	4.312	4.505	4.697	4.889	5.082
$I_0, \text{А}$	1.516	2.792	4.091	5.426	6.813	8.271	9.827	11.516	13.394	15.558	18.195	21.8	31.782
$I_1, \text{А}$	5.553	10.383	15.429	20.727	26.333	32.323	38.811	45.979	54.137	63.885	76.611	96.927	244.26
$I_2, \text{А}$	21.036	38.563	56.085	73.602	91.11	108.61	126.09	143.55	160.98	178.36	195.67	212.82	228.96
$\Sigma \Delta P_H,$ кВт	0.031	0.107	0.231	0.408	0.644	0.945	1.323	1.792	2.379	3.129	4.144	5.732	15.957
$P_2,$ кВт	1.11	3.732	7.894	13.595	20.832	29.601	39.897	51.71	65.03	79.833	96.079	113.67	131.55
$P_1,$ кВт	1.142	3.839	8.125	14.003	21.476	30.546	41.219	53.503	67.409	82.962	100.23	119.4	147.51
η	0.973	0.972	0.972	0.971	0.97	0.969	0.968	0.967	0.965	0.962	0.959	0.952	0.892
$M_{ЭМ},$ $\text{Н} \cdot \text{м}$	0.925	3.17	6.848	12.069	18.971	27.739	38.634	52.047	68.621	89.541	117.46	160.86	426.75
$Q_1,$ кВар	0.282	0.951	2.021	3.499	5.397	7.734	10.534	13.836	17.703	22.247	27.709	34.83	64.95

Графики рассчитанных характеристик рассматриваемого двигателя по критерию $C_M = const$ при различных значениях напряжения в относительных единицах представлены на рис.3.5.

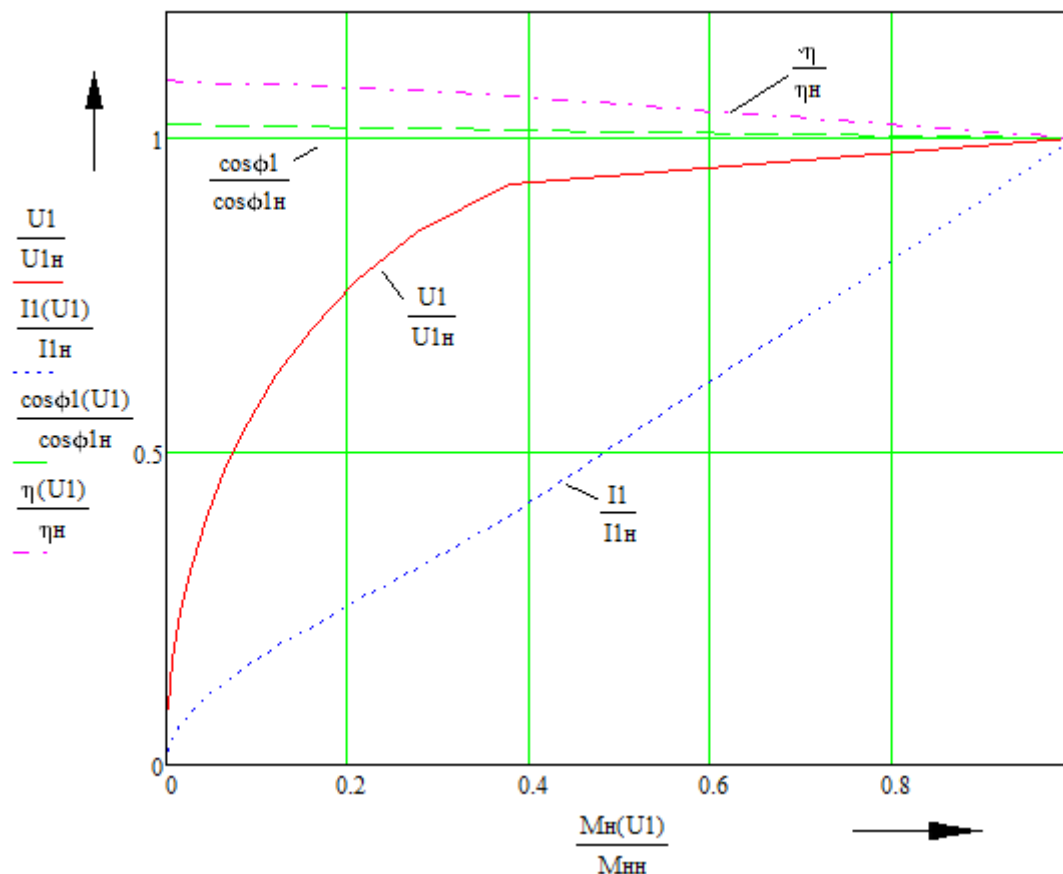


Рисунок 3.5 – Электромеханические характеристики двигателя по критерию $C_M = const$ для различных значений напряжений.

Проведем сравнительный анализ значений КПД при расчете характеристик двигателя различными методами: при различных значениях напряжения $U_1 = var$ и по критерию $C_M = const$ для различных значений напряжений. Для этого построим графики КПД для двух вариантов расчета в относительных единицах (см.рис.3.6).

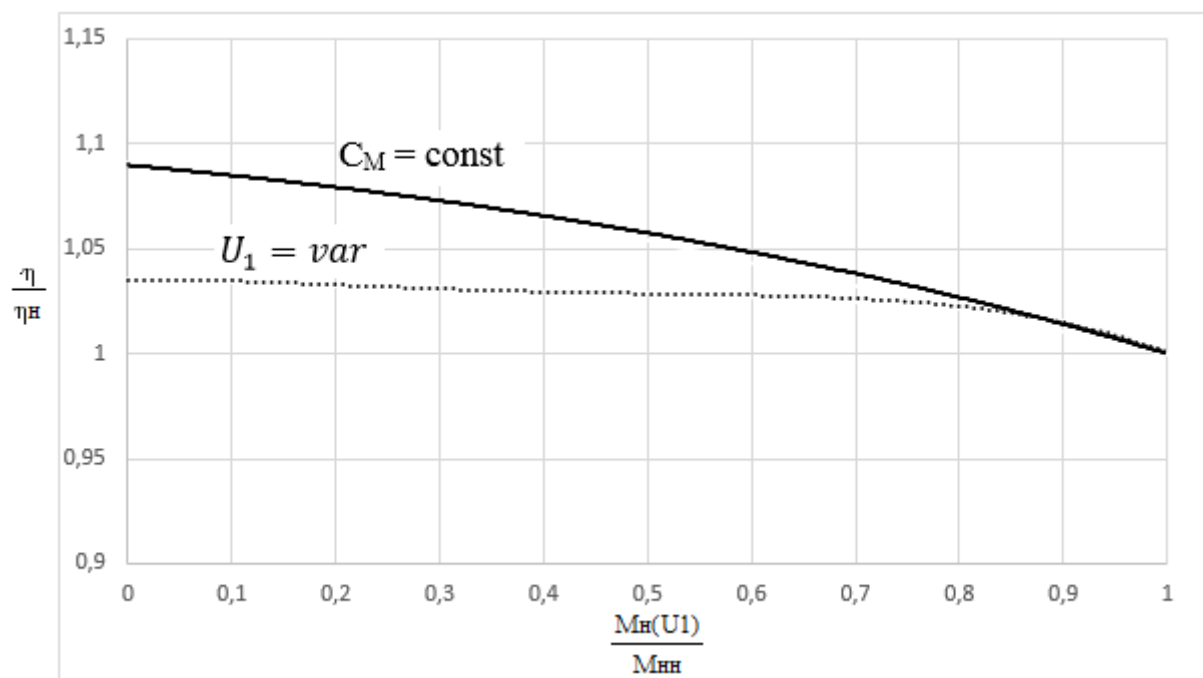


Рисунок 3.6 – Сравнительный анализ графиков КПД двигателя, построенных по критериям $C_M = const$ и $U_1 = var$.

Проанализировав полученные зависимости коэффициента полезного действия от электромагнитного момента в относительных единицах, можем сделать вывод, что значения КПД оказываются выше номинального значения. Однако в методике определения зависимостей существует погрешность равная 0,05 в относительных единицах. Причем, чем ближе значение момента, а то есть и нагрузки двигателя, к номинальному значению, тем меньше оказывается погрешность определения КПД. Разработки по вопросу энергоэффективного управления электрическими машинами в составе тягового электропривода будут продолжаться в будущем.

Настройка математической модели показала достаточно точные результаты определения активных и реактивных сопротивлений двигателя, что позволяет с высокой точностью вычислять значения основных параметров самого двигателя.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Из основного уравнения баланса активной мощности электрической машины

$$M_{\text{ЭМН}} = \frac{P_{1\text{H}} \cdot [\sum \Delta P_i]_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} \quad (4.1)$$

имеем уравнение зависимости суммарных номинальных потерь мощности от КПД

$$[\sum \Delta P_i]_{\text{H}} = P_{1\text{H}} \cdot (1 - \eta_{\text{H}}). \quad (4.2)$$

В качестве исходных данных возьмем значения погрешностей для активной мощности и угловой скорости равные $\delta P_{1\text{H}} = \delta \omega_{\text{H}} = \pm 0.01$, а значения КПД находятся в требуемых пределах $\eta_{\text{H}} = 0.9 \dots 0.95$.

Требуется выполнить расчет точностных характеристик.

По уравнению (4.1) необходимо определить коэффициенты влияния K_p, K_ω, K_Σ активной мощности, угловой скорости и суммарных потерь мощности на электромагнитный момент по данным настроенной модели

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \frac{\delta M_{\text{ЭМр}}}{\delta P_{1\text{H}}} \\ K_\omega &= \frac{\delta M_{\text{ЭМ}\omega}}{\delta \omega_{\text{H}}} \\ K_\Sigma &= \frac{\delta M_{\text{ЭМ}\Sigma}}{\delta \sum \Delta P_{\text{H}}} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где $\delta M_{\text{ЭМ}i}$ - изменение электромагнитного момента при отклонении i -го параметра $\delta P_{1\text{H}}, \delta \omega_{\text{H}}, \delta \sum \Delta P_{\text{H}}$.

Для настроенной модели последовательно дадим отклонение от номинальных значений по активной мощности, угловой скорости в пределах $\delta P_{1\text{H}}, \delta \omega_{\text{H}} \pm 1\%$ и суммарным потерям активной мощности электрической машины в пределах $\delta \sum \Delta P_{\text{H}} \pm 15\%$. Это позволит определить чувствительность момента к данным показателям.

Тогда, определив изменения по электромагнитному моменту, получим

$$K_p = \frac{0.01121}{0.01} = 1.121$$

									Лист
									52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

$$K_{\omega} = \frac{0.0099}{0.01} = 0.99$$

$$K_{\Sigma} = \frac{0.018}{0.15} = 0.121$$

Уравнение среднеквадратичной погрешности по моменту имеет следующий вид

$$\delta M_{\Sigma} = \sqrt{(K_p \cdot \delta P_1)^2 + (K_{\omega} \cdot \delta \omega_H)^2 + (K_{\Sigma} \cdot \delta \Sigma \Delta P_H)^2} \quad (4.4)$$

Вычислим среднеквадратичную погрешность по электромагнитному моменту в процентах при отклонении взятых параметров на $\pm 1\%$

$$\delta M_{\Sigma} = \sqrt{(1.121 \cdot 0.01)^2 + (0.99 \cdot 0.01)^2 + (0.121 \cdot 0.15)^2} \cdot 100\% = 2.355\%.$$

Таким образом, при отклонении активной мощности и угловой скорости от номинала на $\pm 1\%$ и суммарных номинальных потерь мощности на $\pm 15\%$, получим отклонение по моменту равное $\pm 2.355\%$. Данное значение отклонения по электромагнитному моменту оказывается меньше предполагаемого ранее значения отклонения в $\pm(2.5...3)\%$. Это говорит о высокой точности определения момента при использовании энергетического метода в совокупности с разработанной информационно-измерительной системой.

Полагая, что $\delta M_{\Sigma} = \pm(2.5...3)\%$, методом подбора определим допуск на определение суммарных потерь мощности $\delta \Sigma \Delta P_H$.

Для $\delta M_{\Sigma} = 2.5\%$ получим $\delta \Sigma \Delta P_H = 16.52\%$, а для $\delta M_{\Sigma} = 3\%$, суммарные потери мощности равны $\delta \Sigma \Delta P_H = 21.455\%$. Таким образом, для заданных техническим заданием границ точности определения электромагнитного момента в $M_{\Sigma} = \pm(2.5...3)\%$ имеем предполагаемо широкий допуск на определение суммарных номинальных потерь мощности на уровне 16 – 21%, что позволяет определять их косвенным методом.

Зависимость отклонения суммарных потерь активной мощности от КПД $\delta \Sigma \Delta P_H = f(\eta_H)$ представлена на рис.4.1.

Из графика зависимости отклонения суммарных потерь активной мощности от КПД, представленного на рис.4.1, можно видеть прямую зависимость между этими

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>53</i>

величинами. Таким образом, чем выше КПД электрической машины, тем больше допуск на отклонение суммарных потерь.

Для рассчитанной математической модели определим допуск погрешности прямого измерения по активной мощности P_1 . Для этого найдем допуски на определение погрешности по току I_1 , напряжению U_1 и коэффициенту мощности $\cos\varphi_H$. Для этого определим границы точности измерительной аппаратуры, такой как датчики тока и напряжения, необходимые для дальнейшего выбора составных частей информационно – измерительной системы тягового электропривода. Предположительно, примем значение погрешностей в измерении тока и коэффициента мощности равными δI_1 и $\delta \cos\varphi_1 \pm 1\%$, а напряжения $\delta U_1 \pm 0.5\%$.

В таком случае, коэффициенты влияния по данным величинам составят

$$K_I = K_U = K_\varphi = 1$$

А среднеквадратичная погрешность активной мощности δP_1 по аналогии с уравнением (4.4) составит

$$\delta P_1 = \sqrt{(1 \cdot 0.01)^2 + (1 \cdot 0.005)^2 + (1 \cdot 0.01)^2} \cdot 100\% = 1.5\%.$$

Данное значение погрешности измерения активной мощности превышает указанное ранее в условиях, что может повлиять на точность определения момента. Однако, это расхождение легко можно исправить, уменьшив допуск на определение суммарных потерь мощности, либо выбрав для системы более точную измерительную аппаратуру. Попробуем оба варианта и сравним эффективность применения каждого.

Так как допуск на определение $\delta \sum \Delta P_H$ оказался достаточно широким, целесообразным является снижение этого показателя. Таким образом, предполагая, что погрешность на измерение активной мощности равна $\pm 1.5\%$, а погрешность на определение момента находится на заданном уровне $\delta M_{ЭМ} = \pm(2.5 \dots 3)\%$, границы допуска на суммарные номинальные потери мощности будут находиться в пределах 13 - 18%, что все равно дает возможность определять их косвенным способом.

										Лист
										54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

Зависимость отклонения суммарных потерь активной мощности от КПД $\delta \Sigma \Delta P_n = f(\eta_n)$ для разных допусков по активной мощности для $\delta M_{ЭМ} = 2.5\%$ представлена на рис.4.1, а для $\delta M_{ЭМ} = 3\%$ на рис. 4.2.

Из графика, представленного на рис.4.1, можно видеть прямую зависимость между этими величинами. Таким образом, чем выше КПД электрической машины, тем больше допуск на отклонение суммарных потерь.

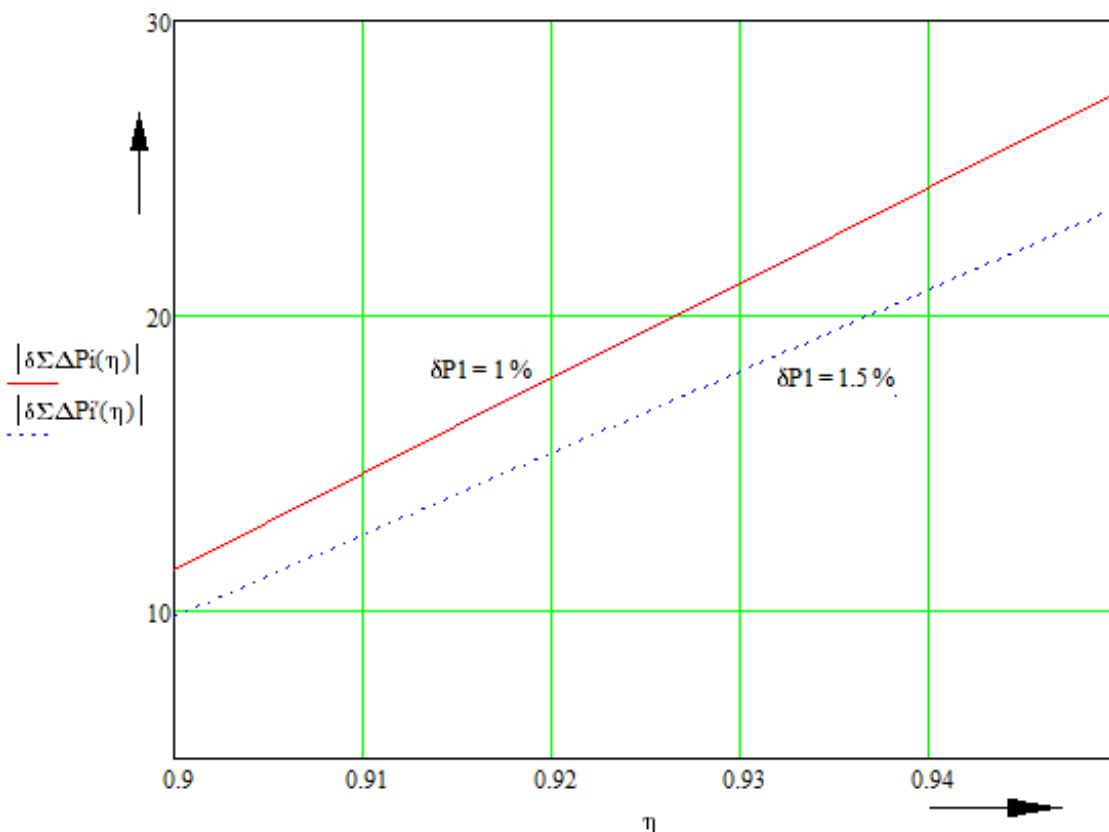


Рисунок 4.1 - Зависимость отклонения суммарных потерь активной мощности в % от КПД для $\delta M_{ЭМ} = 2.5\%$.

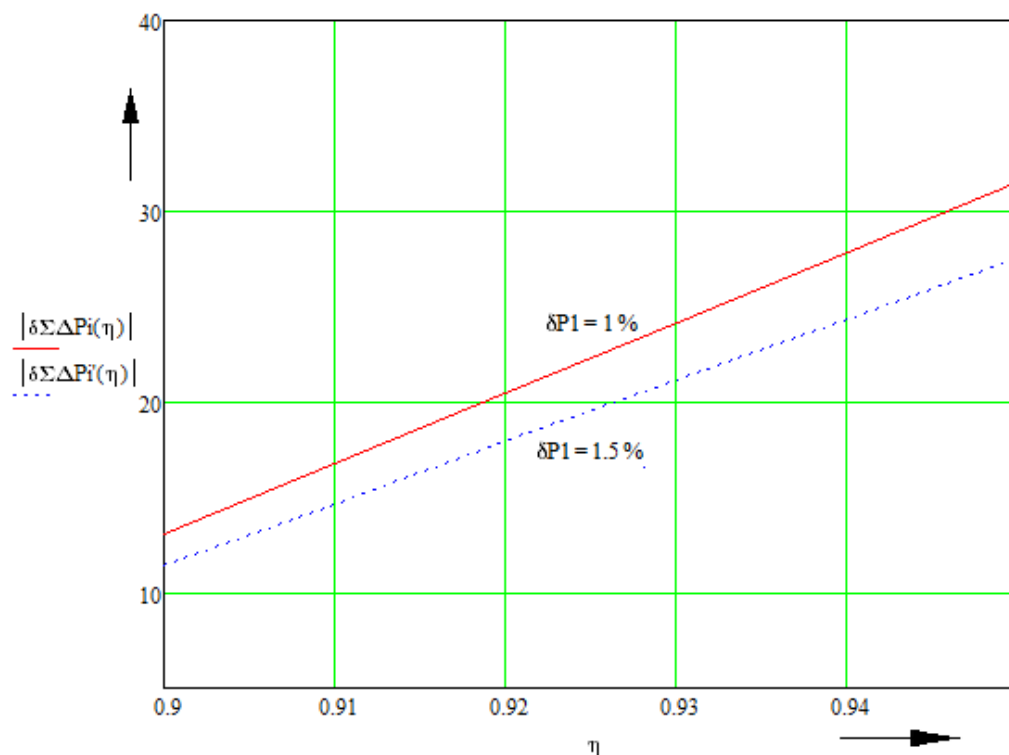


Рис.4.2 - Зависимость отклонения суммарных потерь активной мощности в % от КПД для $\delta M_{ЭМ} = 3\%$.

Второй вариант предполагает улучшить качество измерения показателей системы, то есть, например, уменьшить допуск на погрешность прямого измерения тока до $\delta I_1 \pm 0.3\%$.

В таком случае среднеквадратичная погрешность активной мощности δP_1 составит

$$\delta P_1 = \sqrt{(1 \cdot 0.003)^2 + (1 \cdot 0.005)^2 + (1 \cdot 0.01)^2} \cdot 100\% = 1.15\%.$$

Этот показатель все еще не входит в предполагаемые пределы погрешности измерения. Однако, увеличивает точность ее измерения с 1.5% до 1.15%. При таком показателе погрешности по активной мощности имеем диапазон допуска определения погрешности по суммарным номинальным потерям активной мощности от 15.7 до 20.8 процентов.

5. ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С учетом проведенного моделирования точностных характеристик на примере асинхронного двигателя произведем выбор измерительной аппаратуры, показатели точности измерений которых будут находиться на уровне, указанном в предыдущей главе, а также микроконтроллера достаточной производительности.

Информационно – измерительная система тягового электропривода должна включать в себя следующие компоненты:

- Датчики фазного тока;
- Датчики линейного напряжения;
- Датчик угловой скорости (перемещения);
- Микроконтроллер.

Для выбора измерительной аппаратуры проведем аналитический обзор существующих датчиков на основе эффекта Холла.

Принцип действия датчиков Холла достаточно прост. Они имеют щелевую конструкцию. С одной стороны щели расположен полупроводник, а с другой стороны - постоянный магнит.

В магнитном поле на движущиеся электроны воздействует сила, вектор которой перпендикулярен направлению магнитной и электрической составляющих поля.

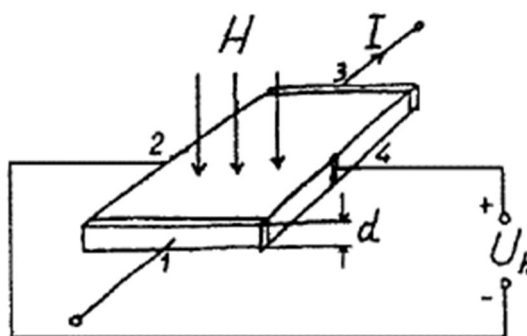


Рисунок 5.1 – Принцип действия эффекта Холла в датчиках.

Если внести в магнитное поле с индукцией В полупроводниковую пластинку (например, из арсенида индия или антимонида индия), через которую протекает

электрический ток, то на боковых сторонах, перпендикулярно направлению тока, возникает разность потенциалов (см. рис.5.1). Напряжение Холла (ЭДС Холла) пропорционально току и магнитной индукции.

Между пластинкой и магнитом имеется зазор. В зазоре датчика находится стальной экран. Когда в зазоре нет экрана, то на пластинку полупроводника действует магнитное поле и с нее снимается разность потенциалов. Если же в зазоре находится экран, то магнитные силовые линии замыкаются через экран и на пластинку не действует, в этом случае разность потенциалов на пластинке не возникает.

Интегральная микросхема преобразует разность потенциалов, которая создается на пластинке, в отрицательные импульсы напряжения определенной величины на выходе датчика. Другими словами, устройство служит для измерения напряжённости магнитного поля. Сегодня датчик Холла может быть как аналоговым, так и цифровым.

Еще одним пунктом в пользу датчиков Холла является то, что они наиболее распространены и доступны, а также позволяют обеспечить требуемый уровень точности системы.

Выбор датчиков тока

На основе вышеописанного принципа действия подобраны датчики тока Холла (см. табл.5.1, рис.5.2). Выбор в их пользу определяется в сторону доступности подобных датчиков, распространенности на рынке и точности измерений при их использовании.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		58

Таблица 5.1 – Технические характеристики датчиков тока [24,25].

Производитель	$\pm I_{PN}$ А	$\pm I_p$ А	Технология	U_C V	V_{out} I_{out} при I_{PN}	Хри I_{PN} $T_A = 25^\circ$	T_A $^\circ C$	№ рисунка	Тип
						%			
LEM	400	± 600	O/L	$\pm 12 \dots 15$	$U_C/2V$ или $V_{ref} \pm 1.25V$	± 1.4	-40...+105	31	НТВ 400- P
LEM	300	± 700	C/L	± 15	150 mA	± 0.4	-40...+85	56	LA 306-S
LEM	500	± 800	C/L	$\pm 15 \dots 24$	100 mA	± 0.3	-40...+70	58	LF 505-S
LEM	300	± 500	C/L	$\pm 12 \dots 20$	150 mA	± 0.3	-40...+85	54	LF 305-S
NK Techno logies	300	600	-	$\pm 12 \dots 18$	5 V	± 1	-25...+85	-	SZ140K D12

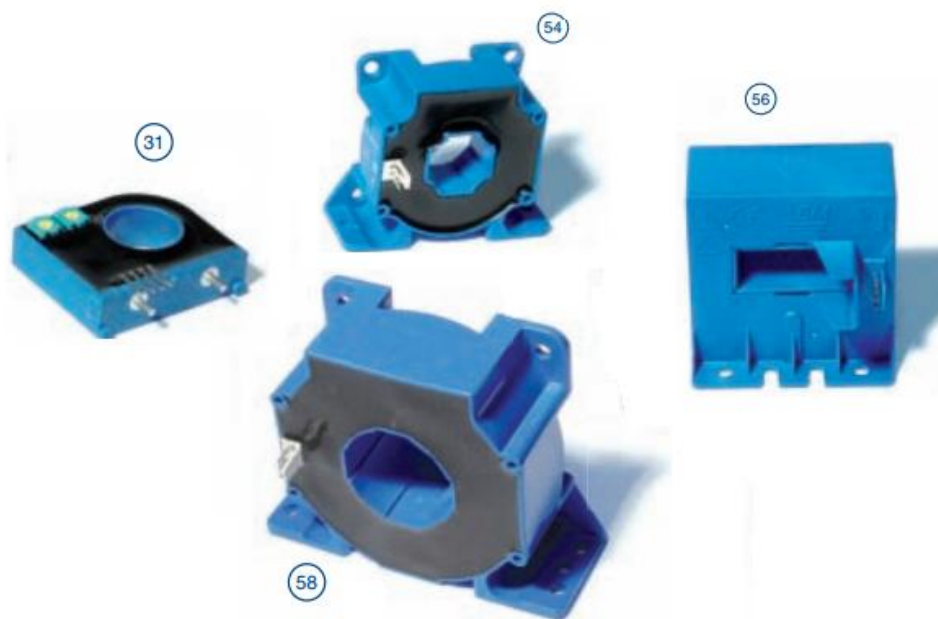


Рисунок 5.2 – Датчики тока фирмы LEM.

Как можно заметить из данных табл.5.1, датчики тока делятся на несколько видов в зависимости от технологии, которая в них используется.

Датчики тока прямого усиления О/Л (Open Loop) имеют следующий принцип действия: магнитный поток, создаваемый первичным током I_P концентрируется в магнитной цепи и преобразуется в воздушном зазоре с помощью элемента Холла (см рис.5.3). Сигнал с элемента Холла усиливается для получения на выходе пропорциональной копии первичного тока.

Датчики тока прямого усиления имеют следующие достоинства:

- Небольшой размер;
- расширенный диапазон преобразования;
- небольшой вес;
- низкое энергопотребление;
- не вносит потерь в первичную цепь.

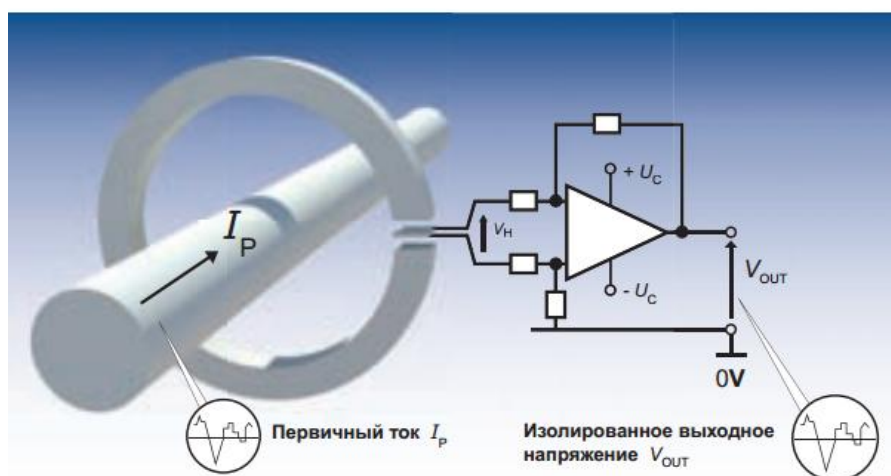


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема действия датчиков тока на основе технологии Open Loop.

Компенсационные датчики тока С/Л (Closed Loop) имеет несколько отличающийся принцип действия: Магнитный поток, создаваемый первичным током I_P , компенсируется таким же потоком, создаваемым током во вторичной обмотке (см.рис.5.4). Вторичный (компенсирующий) ток генерируется с помощью

элемента Холла и электроники датчика. Этот ток является пропорциональной копией первичного тока.

По сравнению с датчиками тока прямого усиления, компенсационные датчики тока имеют следующие достоинства:

- широкий частотный диапазон;
- высокая точность;
- малое время отклика;
- низкий температурный дрейф;
- отличная линейность.

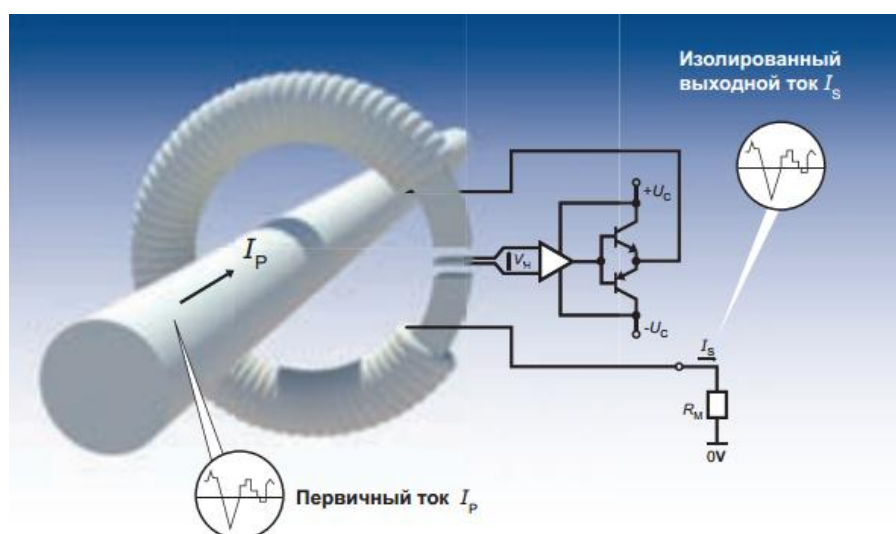


Рисунок 5.4 - Принципиальная схема действия датчиков тока на основе технологии Closed Loop.

Выбор датчиков напряжения

Для настроенной модели асинхронного двигателя по аналогии с датчиками тока выбираем датчики напряжения. В табл.5.2 и на рис. 5.5 представлены датчики напряжения Холла.

Таблица 5.2 – Технические характеристики датчиков напряжения [24,25].

Производитель	$\pm V_{PN},$ V	$\pm V_P,$ V	$U_C,$ V	I_{out} при $V_{PN},$ mA	X_G при $T_A=25^\circ C$	$T_A,$ $^\circ C$	Тип
					% от V_{PN}		
LEM	500	750	$\pm 15 \dots 24$	50	0.5	-40...+85	DVL 500
LEM	750	1125	$\pm 15 \dots 24$	50	0.5	-40...+85	DVL 750
NK Techno logies	600	2500	$\pm 20-45$	4–20	<0.5	-30...+60	VTD3



Рисунок 5.5 – Датчики напряжения фирмы LEM.

Компенсационные датчики напряжения (C/L) отличаются от компенсационных датчиков тока принципиальной схемой (см. рис. 5.6) и имеют следующий принцип

действия: очень небольшой ток, ограниченный последовательно включёнными резисторами, берётся из измеряемой цепи и пропускается через первичную обмотку. Магнитный поток, создаваемый первичным током I_P компенсируется таким же потоком, создаваемым током во вторичной обмотке. Вторичный (компенсирующий) ток генерируется с помощью элемента Холла и электроники датчика. Этот ток является пропорциональной копией первичного напряжения. Первичные резисторы (R1) могут быть встроенными в датчик либо внешними.

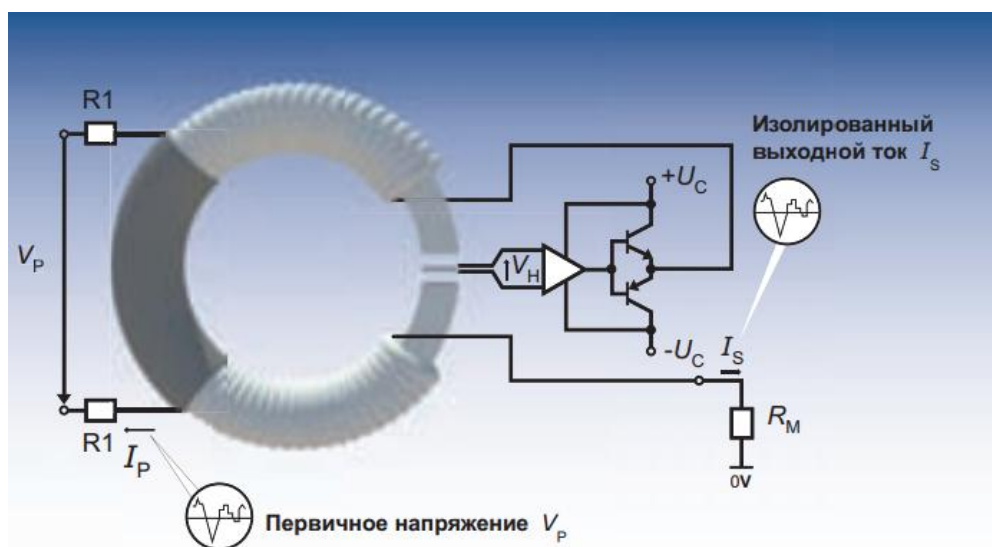


Рисунок 5.6 - Принципиальная схема действия датчиков напряжения на основе технологии Closed Loop.

Данные датчики имеют следующие достоинства:

- измерение высоких напряжений;
- высокий уровень изоляции;
- высокая точность;
- отличная линейность.

Выбор датчиков углового перемещения

Далее произведем выбор датчиков углового перемещения (скорости), который должен подключаться непосредственно к двигателю. Погрешность измерения для данного типа измерительной аппаратуры должна находиться в пределах $\pm 1\%$ согласно указанным ранее условиям для возможности применения энергетического

										Лист
										63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

метода управления асинхронной машиной в составе тягового электропривода с указанной точностью определения электромагнитного момента.

В табл.5.3 указаны датчики углового перемещения, подходящие под данные условия точности.

Таблица 5.3 - Технические характеристики датчиков углового перемещения [26].

Напряжение питания	Точность системы	Инкрементальные сигналы		Абсолютные значения положения		Тип
		Выходные сигналы	Кол-во периодов сигнала на оборот	Кол-во позиций на оборот	Интерфейс данных	
DC от 3,6 до 14 В	$\pm 1^0$	~1 В	32768	536870912 \cong 29 бит	EnDat2.2/02	RCN8580
	$\pm 1^0$				EnDat2.2/22	RCN8510
	$\pm 1^0$	~1 В	36000	536871453 \cong 29 бит	EnDat2.2/24	ROD 880

На рис. 5.7 представлен внешний вид датчика углового перемещения фирмы HEIDENHAIN.



Рисунок 5.7 – Датчик углового перемещения фирмы HEIDENHAIN.

Выбор микроконтроллера

И наконец произведем выбор последней составной части блока информационно – измерительной системы тягового электропривода. Ей является контроллер нагрузки – эталонная модель LC – RM. По сути, это микроконтроллер, на который записывается алгоритм уравнений энергетического метода управления, заданный в главе 2. К выбору данной аппаратуры предъявляется ряд требований. Основная цель выбрать наименее дорогой микроконтроллер (чтобы снизить общую стоимость системы), но в то же время удовлетворяющий спецификации системы, т.е. требованиям по производительности, надежности, условиям применения и т.д.

Для применения в тяговом электроприводе целесообразно будет применение 32-битных микроконтроллеров (МК). 32-разрядные микроконтроллеры содержат высокопроизводительный процессор, соответствующий по своим возможностям младшим моделям микропроцессоров общего назначения. В ряде случаев процессор, используемый в этих микроконтроллерах, аналогичен CISC- или RISC-процессорам, которые выпускаются или выпускались ранее в качестве микропроцессоров общего назначения. Они находят широкое применение в системах управления сложными объектами промышленной автоматики (двигатели, робототехнические устройства, средства комплексной автоматизации производства), в контрольно-измерительной аппаратуре и телекоммуникационном оборудовании.

В качестве МК может быть использована достаточно дешевая микросхема 32-битного микроконтроллера STM32F405 [27] (см. рис.5.8) производительностью до 210 MIPS со встроенными функциями цифровой обработки сигналов и с тремя 12-битными АЦП последовательного приближения с частотой преобразования до 2,4 МГц. При помощи встроенного многоканального мультиплексора, данные АЦП могут обрабатывать одновременно 24 сигнала. Применительно к используемой системе тягового электропривода, сигналы будут обрабатываться по два одновременно, а время задержки между ними не превысит 0,5 мкс. Они включают в себя высокоскоростную память (Flash до 1Мб, SRAM до 192Кб), до 4Кб

									Лист
									65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

резервной SRAM и расширенный диапазон I/O и периферии с подключением к шине AWP, трем шинам ANB и 32-битной матрице шин multi-ANB. Все устройства предлагают три 12-битных АЦП, два ЦАП, RTC малой мощности, двенадцать универсальных 16-битных таймеров и два ШИМ таймера для управления двигателями, два универсальных 32-битных таймера и генератор случайных чисел. Они так же оснащены стандартным и расширенным интерфейсами связи. В МК реализованы цифровые БИХ фильтры Баттерворта 5-го порядка с полосой пропускания 1 кГц, что обеспечивает подавление гармоник ШИМ не менее, чем на 130 дБ. Указанные фильтры вносят групповую задержку в выборки сигналов не более 10 отсчетов [см.сайт+см.статью 2016]. Контроллер нагрузки может быть реализован в указанном микроконтроллере, а преобразование цифровых сигналов, произведенных монитором, в аналоговый вариант можно выполнить с помощью встроенных в МК широтно – импульсных модуляторов ШИМ.

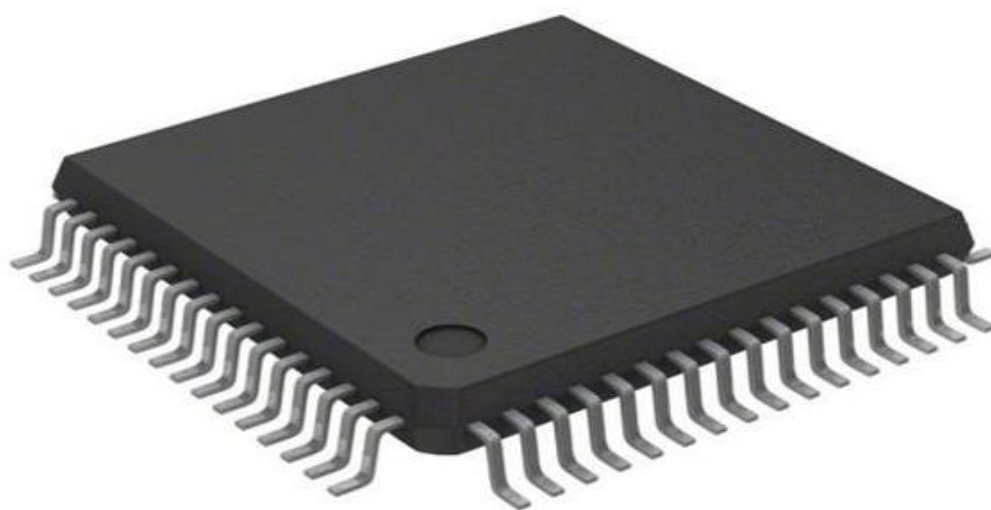


Рисунок 5.8 - Микросхема 32-битного микроконтроллера STM32F405.

Были подобраны датчики тока, напряжения, углового перемещения, а также микроконтроллер для эталонной модели. На данном этапе выбранная измерительная аппаратура соответствует заданным требованиям по точности, а также производительности и быстродействию.

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

6. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

На основании разработанной технологии определения электромагнитного момента в тяговом электроприводе, в состав которого входит асинхронный двигатель (или несколько асинхронных двигателей) получим следующую функциональную схему тягового электропривода с эталонной моделью, представленную на рис.6.1.

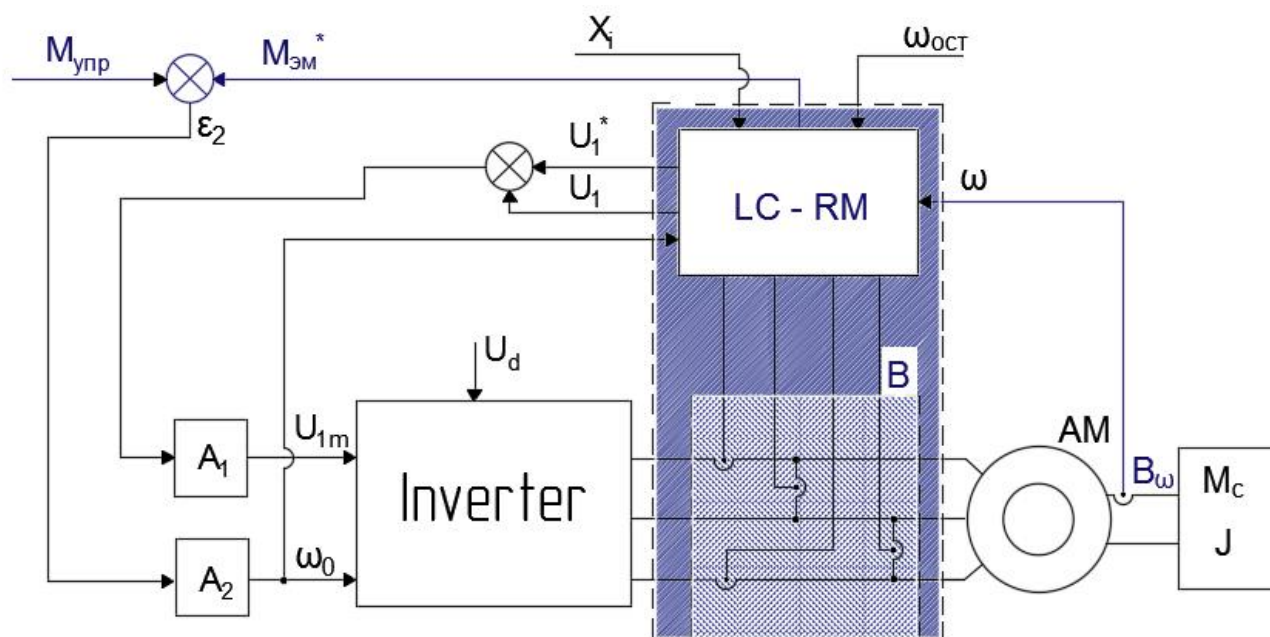


Рисунок 6.1 – Функциональная схема тягового электропривода: В - блок первичных датчиков (измерительных преобразователей); LC - RM - контроллер нагрузки - эталонная модель; B_ω - датчик скорости ротора; AM - асинхронная машина; A_1 и A_2 - регуляторы каналов управления амплитудой U_{1m} и синхронной частотой ω_0 трехфазного напряжения; $M_{упр}$ - управляющее воздействие; U_1 - измеренное напряжение; U_1^* и $M_{эм}^*$ - адаптированные переменные управления; X_i - константы управления состоянием AM; $\omega_{ост}$ - пусковая частота.

Как говорилось ранее, в информационно – измерительную систему электропривода входят: два датчика тока, два датчика напряжения, датчик углового перемещения B_ω и эталонная модель – контроллер нагрузки LC – RM. Назначение и принцип действия каждого из этих элементов по отдельности более подробно

раскрыт в предыдущих главах. Информационно – измерительная система должна обеспечивать равномерность распределения электромагнитного момента между двигателями, а значит точность его определения. Благодаря этому повышается качество управления всей системы тягового электропривода.

Асинхронная машина входит в состав тягового электропривода и является одним из основных его частей. Стоит отметить, что половина всей электроэнергии в мире расходуется такими электродвигателями. Они нашли широкое использование во многих отраслях промышленности, в быту, электроинструменте, так как имеет невысокую стоимость, повышенную надежность, простое обслуживание и эксплуатацию. Область использования таких электромашин становится все шире, так как их конструкция совершенствуется. В переводе с английского, такой электродвигатель называют индукционным. Это объясняется тем, что для создания полюсов применяется явление индукции, другими словами, применяются наводки для образования движущей силы. Особенностью асинхронных двигателей является отличие частоты поля от скорости вращения вала. В других типах двигателей используются постоянные магниты, обмотки и т.д.

Для функциональной схемы, в общем случае, может быть выбран целый ряд асинхронных двигателей мощностью от 30 до 315 кВт, удовлетворяющих эксплуатационным условиям, заданным границам по коэффициенту полезного действия, скоростному режиму. Технические данные электродвигателей основного исполнения для синхронной скорости $n = 3000$ об/мин и степенью защиты IP23 и IP44 представлены в табл.6.1. В состав тягового электропривода может входить несколько взаимосвязанных двигателей, то есть многодвигательные установки, в которых необходимо повышение точности распределения момента между каждым двигателем.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		68

Таблица 6.1 - Технические данные электродвигателей основного исполнения для синхронной скорости $n = 3000$ об/мин.

Типоразмер электродвигателя	$P_{2 \text{ ном}}$, кВт	КПД, % при $P_{2 \text{ ном}}$
Степень защиты IP23		
4АН160М2У3	30	90
4АН225М2У3	90	92
4АН355М2У3	400	95
Степень защиты IP41		
4А200М2У3	37	90
4А250М2У3	90	92
4А355М2У3	315	93

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является самым массовым и надежным устройством для привода различных машин и механизмов. Однако, существует два основных недостатка подобных двигателей—это невозможность простой регулировки скорости вращения ротора, очень большой пусковой ток, который превышает номинальный в 5 – 7 раз. Если использовать только механические устройства регулирования, то указанные недостатки приводят к значительным энергетическим потерям и к ударным механическим нагрузкам, что крайне негативно сказывается на долговечности оборудования.

Частотный преобразователь с широтно – импульсным управлением (ЧП с ШИМ) снижает пусковые токи в 4-5 раз, обеспечивает плавный пуск АД и осуществляет управление приводом по заданной формуле соотношения напряжение / частота с помощью регуляторов A_1 и A_2 .

ЧП позволяет снизить потребление энергии почти в 2 раза. Появляется возможность включения обратных связей между смежными приводами, т.е. самонастройки оборудования под поставленную задачу и изменение условий работы всей системы.

Частотный преобразователь с ШИМ представляет собой инвертор с двойным преобразованием напряжения (см.рис.6.2). ШИМ или PWM (широтно-импульсная

модуляция, по-английски pulse-width modulation) – это способ управления подачей мощности к нагрузке [28]. Управление заключается в изменении длительности импульса при постоянной частоте следования импульсов. Широтно-импульсная модуляция бывает аналоговой, цифровой, двоичной и троичной.

Применение широтно-импульсной модуляции позволяет повысить КПД электрических преобразователей, особенно это касается импульсных преобразователей, составляющих сегодня основу вторичных источников питания различных электронных аппаратов. Обратноходовые и прямоходовые одноктактные, двухтактные и полумостовые, а также мостовые импульсные преобразователи управляются сегодня с участием ШИМ, касается это и резонансных преобразователей.

Сначала сетевое напряжение выпрямляется входным диодным мостом, а затем сглаживается и фильтруется с помощью конденсаторов.

На втором этапе из постоянного напряжения, с помощью микросхем управления и выходных мостовых IGBT ключей, формируется ШИМ последовательность определенной частоты и скважности. На выходе частотного преобразователя выдаются по периодам прямоугольные импульсы, но за счет индуктивности обмоток статора асинхронного двигателя, они интегрируются и превращаются в напряжение близкое к синусоидальному (см. рис.6.3 и рис.6.4).



Рисунок 6.2 – Принципиальная схема преобразователя частоты асинхронного электрического двигателя.

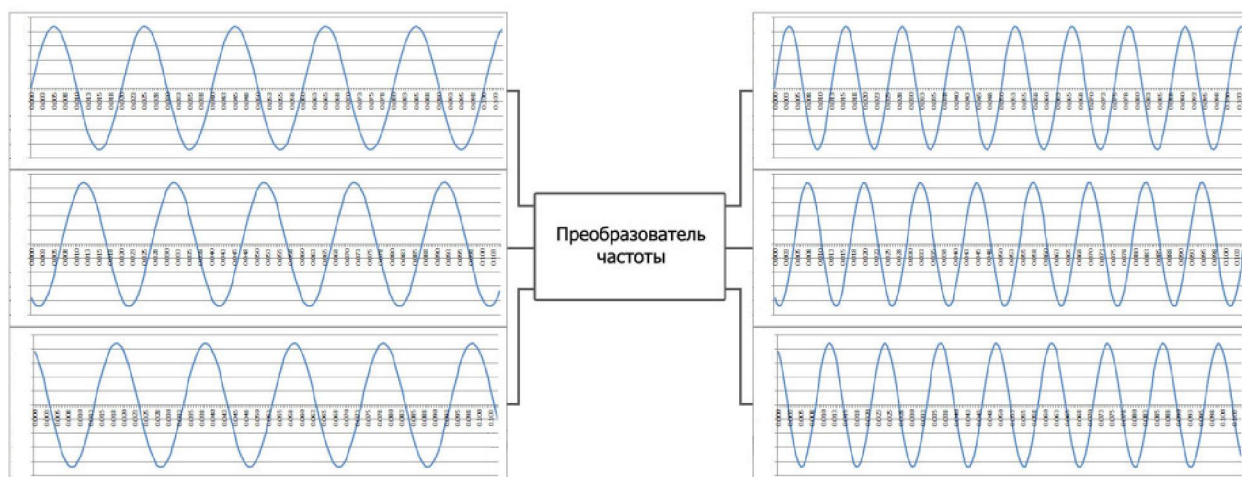


Рисунок 6.3 – Пример преобразования частоты входного напряжения с помощью частотного преобразователя.

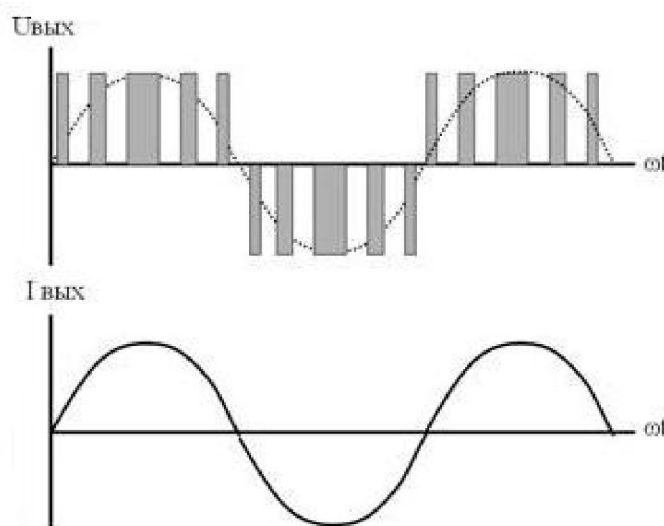


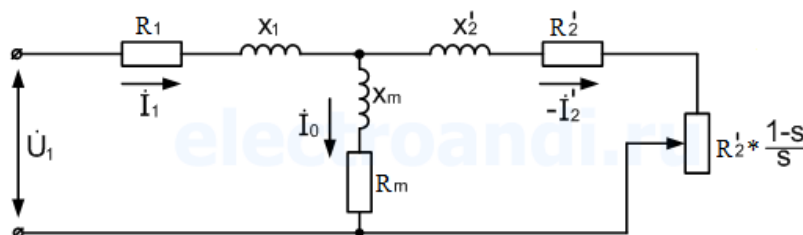
Рисунок 6.4 – График напряжения на выходе ПЧ с ШИМ.

Таким образом, разработана функциональная схема, состоящая из информационно – измерительного блока, АМ, инвертора (ПЧ с ШИМ), канала обратной связи по моменту и канала обратной связи по напряжению.

7. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТРЕБУЕМЫМИ ТОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Техническим заданием было предусмотрено разработать технологию определения электромагнитного момента асинхронной машины в составе тягового электропривода, на основании которой разработана универсальная методика проектирования информационно – измерительной системы тягового электропривода с требуемыми точностными характеристиками.

1. Для начала проектирования необходимы следующие технические данные асинхронного двигателя: номинальные (опытные) значения основных параметров, таких как $U_{1Н}$, $I_{1Н}$, $P_{2Н}$, η_H , $\cos\varphi_H$, s_H ; приблизительные (грубые) значения сопротивлений двигателя, такие как R_0 , R_1 , R_2 , X_0 , X_1 , X_2 .



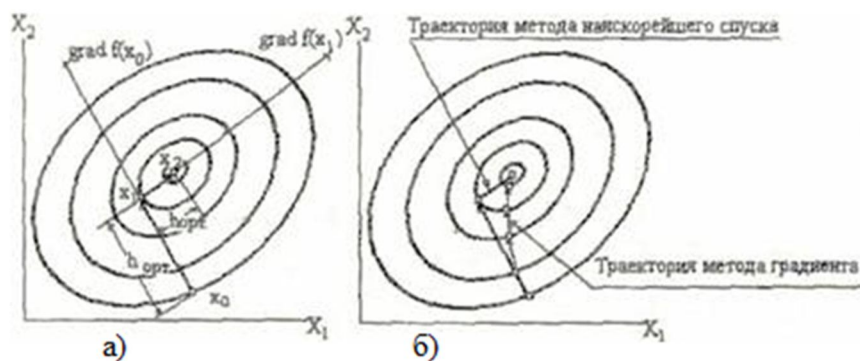
2. Настройка математической модели электрической машины по данным испытаний и техническим данным АД по критерию минимума среднеквадратичного отклонения базовых показателей основана на оптимизации показателей сопротивлений двигателя.

2.1. Выбор базовых показателей. Основан на отборе величин, которые будут непосредственно входить в состав уравнения среднеквадратичного отклонения. Выбор происходит по основным параметрам электрической машины (U_1 , I_1 , P_2 , η , $\cos\varphi/\sin\varphi$, s , ω , $M_{эм}$).

$$\sum \Delta_i = \left(\frac{I_1 - I_{1НЭ}}{I_{1НЭ}} \right)^2 - \left(\frac{\sin\varphi_1 - \sin\varphi_{1НЭ}}{\sin\varphi_{1НЭ}} \right)^2 - \left(\frac{\eta - \eta_{НЭ}}{\eta_{НЭ}} \right)^2$$

2.2. Просчитать модель двигателя с исходными параметрами, определив отклонение от номинала по основным показателям и среднеквадратичное отклонение базовых показателей.

2.3. Произвести оптимизацию модели по методу наискорейшего спуска, следуя пунктам 1-4 параграфа «Настройка модели по методу наискорейшего спуска» главы 3.



2.4. Определить отклонения по основным показателям двигателя с учетом проведенной оптимизации. Если они удовлетворяют необходимым условиям точности и основные параметры близки к экспериментальным номинальным значениям, то принять найденные параметры сопротивлений за номинальные. Если нет, проделать пункт 2.3 еще раз.

3. Моделирование точностных характеристик оптимизированной модели.

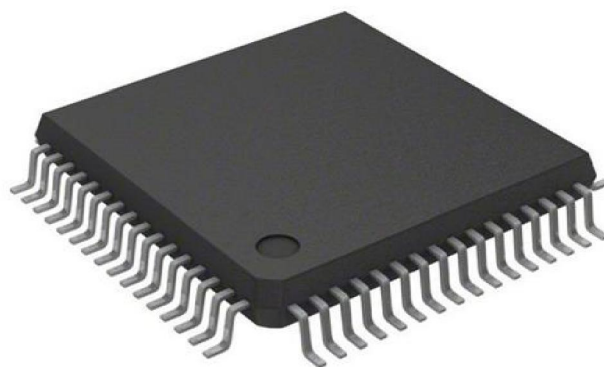
3.1. Настройка и выбор точности измерения активной мощности, угловой скорости и допуска на определение суммарных номинальных потерь мощности заданной модели, исходя из задания границ на определение электромагнитного момента машины.

$$\delta M_{\text{ЭМ}} = \sqrt{(K_p \cdot \delta P_1)^2 + (K_\omega \cdot \delta \omega_n)^2 + \left(K_\Sigma \cdot \delta \sum \Delta P_n\right)^2}$$

3.2. Настройка и выбор точности измерения определения тока I_1 , напряжения U_1 и $\cos\varphi$, исходя из границ точности определения активной мощности.

$$\delta P_1 = \sqrt{(K_I \cdot \delta I_1)^2 + (K_U \cdot \delta U_1)^2 + (K_\varphi \cdot \delta \cos\varphi)^2}$$

4. Выбор измерительной аппаратуры для блока информационно – измерительной системы, такой как датчики тока, напряжения и углового перемещения, а также микроконтроллера для контроллера нагрузки – эталонной модели по данным проведенного моделирования точностных характеристик пункта 3.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ВКР рассмотрены существующие методы управления тяговым электроприводом, на основе которых сделан выбор в пользу энергетического метода формирования электромагнитного момента. Он учитывает недостатки векторного управления и позволяет повысить точность определения электромагнитного момента в 3-4 раза. Разработана функциональная схема информационно – измерительной системы тягового электропривода, в состав которой входят два датчика тока, два датчика напряжения, датчик углового перемещения и эталонная модель электрической машины, реализованная на базе микропроцессора.

Выполнена оптимизация математической модели асинхронного двигателя по критерию минимума среднеквадратичного отклонения базовых показателей, благодаря которой определены значения сопротивлений электрической машины, позволяющие с высокой точностью определять ее основные параметры.

Моделирование точностных характеристик подтвердило реализуемость предъявленных требований к точности определения электромагнитного момента на уровне $\pm (2.5...3) \%$. При этом определены допуски на определение суммарных номинальных потерь активной мощности и их зависимость от КПД, а также допуски на погрешности прямого измерения активной мощности, угловой скорости, тока и напряжения. Кроме того, произведен выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера, входящих в состав информационно – измерительной системы тягового электропривода, с учетом определенных ранее допусков погрешностей, найденных в результате моделирования. Разработана общая функциональная схема тягового электропривода с эталонной моделью.

В результате проделанной работы получена универсальная технология проектирования информационно – измерительной системы тягового электропривода с требуемыми точностными характеристиками. Подтверждено, что данная технология позволяет повысить точность определения электромагнитного

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		75

момента до уровня $\pm (2.5 \dots 3) \%$ приведенной погрешности, то есть в 3-4 раза по сравнению с векторным методом управления.

При выполнении выпускной квалификационной работы использовались такие программы как MathCAD и AutoCAD, при помощи которых производились такие расчеты как настройка математической модели электрической машины по данным испытаний и техническим данным и моделирование точностных характеристик электрической машины на примере АД, а также разработка функциональных схем как информационно – измерительной системы тягового электропривода, так и общей схемы тягового электропривода.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		76

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peter Vas. Sensorless vector and direct torque control Oxford New York Tokyo, Oxford University Press, 1998- 729 с.
2. Время электроники. Экономичный экологичный гибридный городской автобус. – <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/44113/>.
3. ГОСТ Р 50369-92 Электроприводы. Термины и определения.
4. Электрический мусоровоз КАМАЗ: первая информация. – <https://autoreview.ru/articles/gruzoviki-i-avtobusy/elektricheskiy-musorovoz-kamaz>.
5. Электробус Proterra Catalyst E2 – <https://mda-tech.ru/proterra-catalyst-e2/>.
6. И.П. Ксенович, А.А. Ипатов, Д.Б. Изосимов. Технологии гибридных автомобилей: состояние и пути развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками//Мобильная техника, № 2—3, 2003 г.
7. Stanislav N. Florentsev. From Russia with Automotive. AC electric drive of a hybrid city bus//Power System Design Europe. July/August 2009. P. 50—51.
8. Богданов К.Л. Тяговый электропривод автомобиля / Константин Леонидович Богданов. – М.: МАДИ, 2009. – 57 с.
9. Тяговый электрический привод: учеб. пособие для вузов / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 315 с.
10. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Н62 Г. В. Никитенко; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь, 2012. – 240 с.
11. Bial Akin, Nishant Garg. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors. Application report. SPRABQ8. - Dallas, USA: Texas Instruments.
12. F. Blasche. «The principle of rotating-field machines» Siemens Review, vol. 34, pp. 217 – 220. 1972.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		77

13. Келлер А., Сергеевский Ю.Н. Прямое измерение момента в электроприводе / Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 07-09 октября 2014 г. с. 58-62.
14. Смолин В.И., Топольская И.Г., Гладышев С.П. Энергетический метод управления моментом тяговой синхронной машины / Международная конференция SAE по электроприводу. Детройт, 12-14 апреля 2018 г.
15. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. А.Э. Кравчик, М.М. Далаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. - М.: Энергоиздат, 1982.-504 с.
16. Международный производитель электромобилей и комплектующих. - <https://www.tesla.com/>.
17. Международный производитель запчастей для электродвигателей. - <https://www.remyinc.com/>.
18. Betz R.E., Cook B.J., «Instantaneous Power Control of Induction Machines», Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, 21 №1, pp. 57-63, 2001.
19. Казаков Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях: учебное пособие для вузов / Ю.Б. Казаков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.
20. Smolin V.I., Topolskaya I.G., Volovich G.I. (2016). The energy method for monitoring the instantaneous state and the information of a synchronous motor control variables. Paper presented at the 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911509.
21. Смолин В.И. Теория обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» - 2013. - №1 (13).

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>78</i>

22. Smolin V.I. Amplitude control of the moment of a three – phase asynchronous drive based on generalized energy – flow principles / V.I. Smolin, I.G. topol'skaya // Russian Electrical Engineering. – 2014. – vol. 85, № 4. – P. 205 – 209.
23. Виноградов И.М. Математическая энциклопедия. / Под ред. И.М. Виноградов. Серия «Энциклопедии, словари, справочники». В 5 томах. Том 1. М.: Советская энциклопедия. 1977. - 576 с.
24. Производитель измерительных преобразователей LEM. - <https://www.lem.com/ru/>.
25. Производитель измерительной аппаратуры NK Technologies. - <https://www.nktechnologies.com/>.
26. Производитель измерительной аппаратуры HEIDENHAIN. - <http://heidenhain.i-sensors.ru/>.
27. Магазин электронных компонентов и приборов. - <https://www.chipdip.ru/product/stm32f405rgt6>.
28. Принцип работы частотного преобразователя и критерии его выбора для потребителя. - <http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/726-princip-raboty-chastotnogo.html>.

					13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Факультет «Энергетический»
Кафедра «Теоретические основы электротехники»
Специальность «Электротехнологические установки и системы»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ (И.О.Ф.)

_____ 2018 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента

Никифоровой Елены Анатольевны

(Ф.И.О. полностью)

Группа П-474

1 Тема работы

Технология определения мгновенного электромагнитного момента электрических машин в тяговом электроприводе

утверждена приказом по университету от _____ 2018 г. № _____

утверждена распоряжением по факультету от _____ 2018 г. № _____

2 Срок сдачи студентом законченной работы _____

3 Исходные данные к работе

3.1. Цель дипломной работы: разработка технологии определения мгновенного электромагнитного момента асинхронной машины в составе тягового электропривода.

3.2. Разработка предназначена для управления моментом многодвигательного тягового электропривода.

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

3.3. Область применения двухдвигательный электропривод легкового транспорта, многодвигательный электропривод грузового транспорта, многодвигательные системы транспортеров сыпучих материалов (уголь, щебень и т.д.), а также намоточные устройства однодвигательных электроприводов (намотка бумаги, проволоки и т.д.).

3.4. Информационно – измерительная система тягового электропривода должна обеспечивать распределение крутящего момента между отдельными двигателями с приведенной погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$.

3.5. Мощность асинхронных двигателей тягового электропривода может находиться в диапазоне 30 – 315 кВт со скоростным режимом от 0 до 6000 об/мин.

3.6. Технологию разработки информационно – измерительной системы тягового электропривода необходимо рассмотреть на примере асинхронного двигателя с использованием технических данных (указать литературу).

4 Перечень подлежащих разработке вопросов

4.1. Аналитический обзор по теме: анализ методов управления вращающим моментом в тяговом электроприводе. Выбор прототипа и метода решения задачи.

4.2. Выбор метода формирования электромагнитного момента и разработка функциональной схемы информационно – измерительной системы электропривода.

4.3. Настройка математической модели электрической машины по данным испытаний и техническим данным асинхронного двигателя.

4.4. Моделирование точностных характеристик модели на примере асинхронного двигателя.

4.5. Выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера информационно – измерительной аппаратуры тягового электропривода на примере асинхронного двигателя.

4.6. Разработка функциональной схемы тягового электропривода с эталонной моделью.

4.7. Технология проектирования информационно – измерительной системы тягового электропривода с требуемыми точностными характеристиками.

5 Перечень графического материала

5.1. Функциональная схема тягового электропривода с эталонной моделью.

5.2. Технология проектирования информационно – измерительной системы тягового электропривода.

5.3. Разработка функциональной схемы информационно – измерительной системы электропривода.

Всего 83 листов

6 Дата выдачи задания _____

Руководитель _____
(подпись) (И.О. Ф.)

Задание принял к исполнению _____
(подпись студента) (И.О. Ф.)

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		82

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

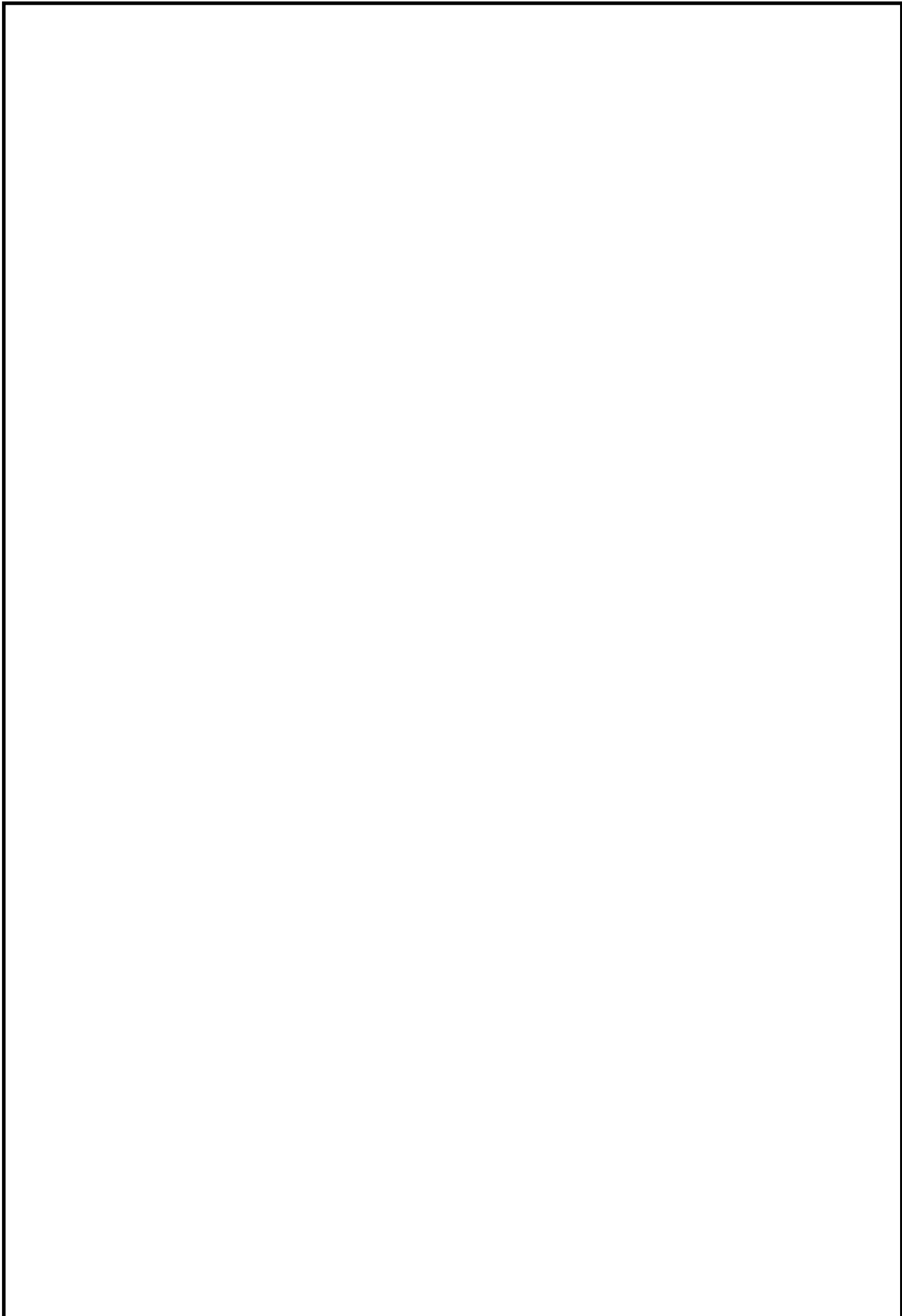
Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Аналитический обзор по теме	Ноябрь 2017	
Выбор метода формирования электромагнитного момента	19.02 – 3.03	
Разработка функциональной схемы ИИС ТЭП с энергетическим методом управления	6.03 – 20.03	
Настройка математической модели электрической машины	21.03 – 9.04	
Моделирование точностных характеристик	10.04 – 18.04	
Выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера	23.04 – 30.04	
Разработка функциональной схемы ТЭП с эталонной моделью	1.05 – 17.05	
Технология проектирования ИИС ТЭП с требуемыми точностными характеристиками	18.05 – 23.05	

Заведующий кафедрой _____ /И.О. Ф. _____ /

Руководитель работы (проекта) _____ /И.О. Ф. _____ /

Студент _____ /И.О. Ф. _____ /

					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83



					<i>13.03.02.2018.224 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>84</i>